

## CAPÍTULO I MARCO TEÓRICO

### 1.1 ACEITE

La palabra aceite proviene del árabe *az-záyt*, el jugo de la aceituna y este del arameo *zaytā*. Es un término genérico para designar numerosos líquidos grasos de orígenes diversos que no se disuelven en el agua y que tienen menor densidad que ésta. Originalmente la palabra aceite se refería únicamente al aceite de oliva, pero posteriormente se generalizó para denominar a aceites vegetales, animales o minerales sustituyendo a óleo en la mayoría de sus acepciones (Real Academia Española RAE, 2014).

### 1.2 LÍPIDOS

Los lípidos son el principal constituyente de las membranas celulares, son las biomoléculas más hidrofóbicas y con mayor poder energético a nivel celular. Son un grupo químicamente diverso y por tanto, desempeñan funciones biológicas muy variadas. Al agrupar un conjunto muy heterogéneo de moléculas orgánicas cuya particularidad es que son insolubles o muy poco solubles en agua pero muy solubles en compuestos orgánicos no polares, pueden ser extraídos a partir de los materiales naturales en que se encuentran (tejidos vegetales o animales), por medio de solventes orgánicos, por ejemplo éter, hexano, éter de petróleo, etc.

Dependiendo de la presencia o no de ácidos grasos (unidos por enlaces éster) en su estructura, los lípidos se pueden clasificar en:

- Lípidos saponificables: formados por ésteres de ácidos grasos. Hay de dos tipos, simples y complejos.
- Lípidos insaponificables: no contienen ácidos grasos.

### 1.2.1 Ácidos Grasos

Los ácidos grasos son ácidos monocarboxílicos de cadena alifática, con número par de átomos de carbono que podrían ser saturados e insaturados. En forma pura, todas las grasas y los aceites están constituidos exclusivamente por triacilglicéridos (o triglicéridos), los que a su vez son ésteres de ácidos grasos con glicerol; por consiguiente, dichos ácidos representan un gran porcentaje de la composición de los triacilglicéridos y en consecuencia de las grasas y los aceites. Las diferencias de estabilidad a la oxidación, de plasticidad, de estado físico, de patrón de cristalización, de índice de yodo, de temperaturas de solidificación y de fusión de las grasas y los aceites se deben fundamentalmente a sus ácidos grasos constituyentes. Para su estudio, los ácidos grasos se han dividido en dos grandes grupos, los saturados y los insaturados (Badui D.S., 2006).

- **Ácidos grasos Saturados**

Pueden ser saturados cuando no tienen dobles enlaces en la molécula. Entre los más comunes está el láurico, el esteárico y el butírico (Badui D.S., 2006).

- **Ácidos grasos Insaturados**

Son muy abundantes en los aceites vegetales y marinos, tienen menor temperatura de fusión que los saturados. Si hay un solo enlace doble, se denominan monoinsaturados y poliinsaturados los que poseen más de uno (Badui D.S., 2006).

Dentro de los ácidos grasos polinsaturados, el omega-3 y el omega-6 son los más abundantes en los mamíferos. Sus precursores, los ácidos alfa linolénico (ALA) y linoleico (LA), se consideran ácidos grasos esenciales (AGE), porque el organismo los requiere para su normal funcionamiento y no se pueden sintetizar endógenamente. Éstos sólo se pueden adquirir a través de la alimentación (Offarm, 2005).

El ácido  $\alpha$ -linoleico se convierte en ácido eicosapentanoico (EPA) que es importante en el funcionamiento correcto de los nervios. Los aceites vegetales que contienen cantidades grandes de ese ácido pueden ser usados como alternativa por los

vegetarianos. La Linaza y el aceite de Linaza son fuentes particularmente ricas en ácido a-linoleico.

### 1.3 ACEITE VEGETAL

El aceite vegetal es el líquido graso obtenido a partir de semillas u otras partes de las plantas en cuyos tejidos se acumula como fuente de energía, se obtiene especialmente de diversos vegetales y se utiliza con fines alimenticios, energéticos o lubricante (Danger T. García et. al, 2017).

La composición química de los aceites vegetales corresponde en la mayoría de los casos a una mezcla de 95% de triglicéridos y 5% de ácidos grasos libres, de esteroides, ceras y otros componentes minoritarios. Los triglicéridos son triésteres formados por la condensación (unión) de ácidos grasos con glicerol (Danger T. García et. al, 2017).

Las sustancias a partir de las cuales se producen los aceites son semillas o frutos. En realidad, todas las semillas y frutos contienen aceite, pero sólo los llamados oleaginosos sirven para la producción industrial de aceite. Entre las semillas de plantas cultivadas por su aceite, las más conocidas son: el cacahuete, la colza, el ricino, la soja y el girasol. A estas se deben agregar las plantas cultivadas para la producción de fibras textiles y en segundo lugar aceite: algodón y Linaza principalmente. En cuanto a los frutos oleaginosos, estos provienen principalmente del cocotero (copra), del nogal, de la palma de aceite (palma y palmito) y del olivo (aceitunas).

En la siguiente Tabla I-1, se presenta un listado de los aceites que se obtienen a partir de distintas plantas.

**Tabla I-1**  
**Aceites que se obtienen de distintas plantas**

Denominación Comercial	Parte de la planta de la cual se obtiene	Planta de la que se obtiene (Nombre científico)
Aceite de algodón	Semillas de algodón	Variedades de distintas especies del genero gossypium
Aceite de cártamo	Semillas de cártamo	Variedades del Carthamus tintorius
Aceite de coco	Semillas de coco	Cocos nucifera (L)

Aceite de girasol	Semillas de girasol	Variedades de Heliantus unnum (L)
Aceite de Linaza	Semillas de Linaza	Variedades de Linum usitatissimum L.
Aceite de maíz	Semillas de maíz	Variedades de Zea Mays
Aceite de maní	Semillas de maní	Variedades de Arachis hypogaea (L)
Aceite de nabo	Semillas de nabo	Especies de Brassica
Aceite de Oliva	Pulpa de frutos del Olivo	Olea europea
Aceite de colza	Semillas de colza	Brassica Campestris
Aceite de palma	Semillas de Pulpa de frutos de la palma	Elaesis guinnensis
Aceite de ricino	Semillas de ricino	Ricinus communis (L)
Aceite de sésamo	Semillas de sésamo	Sesamun indicum (L)
Aceite de uva	Semillas de uva	Especies de Vitis vinifera (L)
Aceite de tung	Semillas de tung	Especies aleurities fordii
Aceite de soja	Semillas de soja	Variedades de Glycine soja

**Fuente:** Simons, 2010.

### 1.3.1 Análisis Fisicoquímico de un Aceite Vegetal

Entre los análisis fisicoquímicos más importantes que se deben realizar al aceite crudo de semillas oleaginosas, se encuentran los siguientes:

- ✧ Acidez Total.- Se expresa como ácido oleico en gramos por 100, es una medida del porcentaje de ácidos grasos libres en el aceite.

Un valor elevado de acidez muestra que el aceite contiene una alta cantidad de ácidos grasos libres, ya que ha experimentado un alto grado de hidrólisis (Danger T. García et. al, 2017).

- ✧ Índice de Peróxidos.- Es una forma de medir la cantidad de oxígeno asociado a esta transformación y se expresa como la cantidad de miliequivalentes de oxígeno contenidos en 1000 g de aceite vegetal.

La determinación del índice de peróxido es una de las técnicas para determinar el estado de conservación del alimento a través de la determinación de peróxidos como producto resultante primario de la oxidación del aceite, los cuales destruyen vitaminas liposolubles: A, D, E, caroteno y parte de los ácidos grasos esenciales y paraliza la biosíntesis de vitamina K (Danger T. García et. al, 2017).

- ✧ Humedad.- Se refiere a la pérdida de masa, comprende el contenido de agua, materias volátiles y el aumento de masa debido a oxidación, se expresa en gramos por 100, de un aceite vegetal sometido a calentamiento.
- ✧ Densidad.- Es la relación entre el peso y el volumen que ocupa el aceite, y en este caso es afectada por la temperatura (Leocadia Pérez, 2008).
- ✧ Índice de Refracción.- El índice de refracción es una medida que determina la reducción de la velocidad de la luz al propagarse por un medio homogéneo. Este parámetro está relacionado con la estimación de la pureza de sustancias (Danger T. García et. al, 2017).

La medición de índice de refracción permite ayudar conjuntamente con otros índices a identificarlos o diferenciarlos de otros aceites. Los índices de refracción tanto de aceites como de ácidos grasos, aumentan conforme aumenta la longitud de las cadenas de hidrocarburos y el número de enlaces dobles de las cadenas (Leocadia Pérez, 2008).

#### **1.4 SEMILLAS OLEAGINOSAS**

A nivel mundial, las oleaginosas más cultivadas son la soja, la colza y el girasol, pero también hay otras producciones importantes como la palma, el maní y la Linaza, que se destina también para uso textil. Las oleaginosas son plantas de cuya semilla o fruto puede extraerse aceite, tanto para el consumo humano como para uso industrial. El principal destino de estas plantas es la producción de aceites pero también se destinan a la producción de piensos animales por su aporte de proteínas y a la alimentación humana. La gran ventaja de los aceites de semillas oleaginosas es que además de grasas producen también proteínas (FAO, 2014).

A nivel mundial, la producción de girasol, soja y colza constituye el 80% de la producción mundial de semillas oleaginosas y el 20% restante corresponde a las producciones de semillas de algodón, cacahuete, Linaza oleaginosa, etc. En 2014, la producción mundial de semillas oleaginosas se elevó a 430 millones de toneladas, 24 millones de toneladas más que lo producido un año antes (FAO, 2014).

### 1.4.1 Linaza

La Linaza (*Linum usitatissimum* L.) es una planta de período anual, herbácea de 40 a 80 cm de altura. Posee raíces cortas y fibrosas, y un único tallo erguido, hueco, con más o menos ramificaciones según la variedad. Las hojas son pequeñas, enteras, alargadas, estrechas, ovales y dispuestas de forma alterna en el tallo. Las flores crecen en la parte superior del tallo, son de color blanco o azul, con cinco pétalos (Beatriz Sebastián Peña, 2007).

Su fruto es una cápsula globosa de 8 a 12 mm, rodeada por los sépalos y se abre para liberar las semillas. Contiene generalmente 10 semillas comprimidas color café a negruzcas, brillantes y de forma aplastada y alargada de 5 a 6 mm (URL, Heike Vibrans (ed.), 2009).

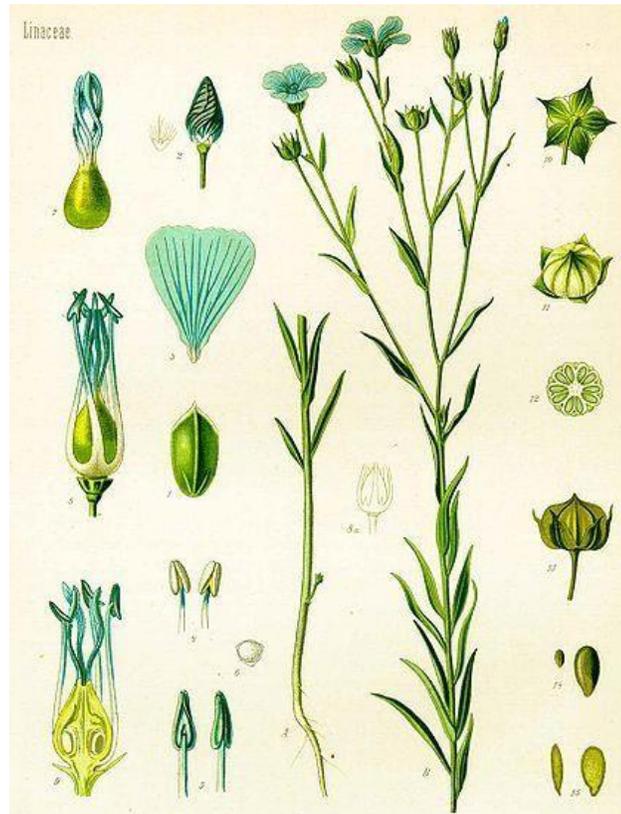
A continuación en la tabla I-2, se detalla la taxonomía del cultivo de Linaza.

**Tabla I-2 Taxonomía del cultivo de Linaza**

Clasificación taxonómica	
Reino	Vegetal
Phylum	Teleomorphytae
División	Tracheophytae
Subdivisión	Anthophyta
Clase	Angiosperma
Subclase	Dicotyledoneae
Grado Evolutivo	Archichlamydeae
Grupo de Órdenes	Corolinos
Orden	Geraniales
Familia	Linnaceae
Nombre científico	<i>Linum usitatissimum</i> L.
Nombre común	Linaza

**Fuente:** Herbario Universitario (T.B.), 2018.

**Figura 1-1** Planta de Linaza



**Fuente:** Jessica del Pilar Durán Córdova, 2014.

La Linaza es una planta originaria del Cáucaso, se cultiva en Europa, África del norte, América, Sur América y Canadá. En países templados y fríos, desde el nivel del mar hasta 4 000 metros de altitud. Se cultiva en campos con tierra ligera, fresca y bien estercolada. La recolección de la Linaza se realiza cuando está totalmente maduro. Una vez arrancado se pone a secar bajo cubierto o al aire libre y luego se trillan los tallos para separar las semillas que se utilizarán una vez hayan adquirido un grado suficiente de sequedad.

#### **1.4.2 Semilla de Linaza**

La semilla de Linaza contiene una cubierta con un endosperma delgado, un eje del embrión y dos cotiledones que comprenden 36%, 4%, 55%, respectivamente del peso total de la semilla. Su cubierta es de apariencia suave y brillante, de color café, y tiene

un sabor muy parecido al de la nuez. Su color y la composición nutricional, pueden variar dependiendo de la variedad. De manera generalizada, se reporta que el tipo de proteínas en la semilla, mayoritariamente son globulinas y albúmina. Es rica en arginina, ácido aspártico, ácido glutámico. El aceite constituye el principal componente, su proporción varía entre 32% a 43% (base seca). Los cotiledones son el principal tejido de almacenamiento de aceite y su composición mayoritaria son triglicéridos, también posee fosfolípidos y ácidos grasos libres; las principales especies presentes en esta zona son los ácidos  $\alpha$ -linolénico, linoléico y oleico. La cáscara también posee en menor proporción lípidos (principalmente ácido palmítico). En la capa externa de la semilla tiene una considerable proporción de fibra dietética (28% de su peso). Los tipos de fibra que se hallan en la linaza son: celulosa, lignina y mucílago (Luis Ojeda, et al, 2017).

A continuación como referencia, en la tabla I-3 se presentan parámetros fisicoquímicos para la semilla de Linaza (*Linum usitatissimum* L.), variedad marrón.

**Tabla I-3**

**Composición fisicoquímica de la semilla de Linaza**

Parámetros	% p/p
Humedad	7,2
Proteína	19,9
Materia grasa	37,4
Cenizas	3,1
Hidratos de carbono	7,2
Fibra dietética	25,2

**Fuente:** Paula Jiménez P., et al, 2013.

**1.4.3 Aceite de semilla de Linaza**

Se obtiene de la semilla de Linaza (*Linum usitatissimum* L.), originaria de Asia Central. El contenido en aceite en la semilla varía del 32 al 43 %. El componente principal del aceite de Linaza es el ácido linolénico. Su porcentaje varía sensiblemente: los procedentes de Argentina tienen un contenido de ácido linolénico relativamente bajo (45 – 53 %); los procedentes de la India, Canadá, Nueva Zelanda y

Europa tienen un contenido de ácido linolénico que se aproxima, y a veces supera el 60 %. Painter y Nesbitt han encontrado que alguna variedad de Linaza tiene aceites con composiciones características, y que dicha composición está también influenciada por las condiciones ambientales y de crecimiento. Esto explica la gran variedad de ciertas características en el aceite de Linaza (Dr. E. Bernardini, 1981).

La composición de ácidos grasos de aceites de Linaza, determinada por cromatografía de gas-líquido de muestras auténticas (expresada en porcentaje del total de ácidos grasos), se presenta en la Tabla I-4.

**Tabla I-4**

**Composición porcentual de ácidos grasos en el Aceite de Linaza**

<b>Ácidos Grasos</b>		<b>% Total</b>
<b>Nombre</b>	<b>Abreviatura</b>	
Ácido Palmítico	C16:0	4-13
Ácido Palmitoléico	C16:1	0-0,5
Ácido Esteárico	C18:0	2-5
<b>Ácido Oleico</b>	<b>C18:1</b>	<b>10-34</b>
<b>Ácido Linoléico</b>	<b>C18:2</b>	<b>12-18</b>
<b>Ácido Linolénico</b>	<b>C18:3</b>	<b>35-71</b>
Ácido Araquídico	C20:0	0-0,2
Ácido Gadolínico	C20:1	0-0,6
Ácido Erúcico	C22:1	0-0,1
Ácido Oleico trans	C18:1t	≤0,05
Ácido Linoléico trans	C18:2t	≤0,05

**Fuente:** Comisión del CODEX Alimentarius, 2016.

Como se ha mencionado anteriormente, los resultados del análisis fisicoquímico realizado al aceite de Linaza obtenido en la parte experimental de la presente investigación serán comparados con los establecidos en el CODEX Alimentarius, bajo la norma que rige las especificaciones para dicho producto.

Tabla I-5

## Especificaciones del Aceite Crudo de Linaza

Características Generales	
Aspecto (a 20 °C)	Limpio
Color	Amarillo pálido
Presentación del producto	Líquido
Olor y Sabor	Característico
Características Fisicoquímicas	
Parámetros	Resultado
Densidad Relativa (a 20°C)	0,925-0,935
Índice de Refracción (ND 40 °C)	1,4720-1,4750
Índice de Peróxido (meq. O <sub>2</sub> /kg)	Máx. 10
Humedad (%)	Máx. 0,5
Acidez (% ácido oleico)	0,304±0,028

**Fuente:** Arilmi Gorriti, et. al., 2010. Comisión del CODEX Alimentarius, 2016.

### 1.5 PROCESO DE OBTENCIÓN DE ACEITE A PARTIR DE OLEAGINOSAS

El proceso de extracción de aceite de semillas comprende tres grandes grupos de operaciones:

- a) Recepción, acondicionamiento, almacenamiento de la semilla en fábrica.

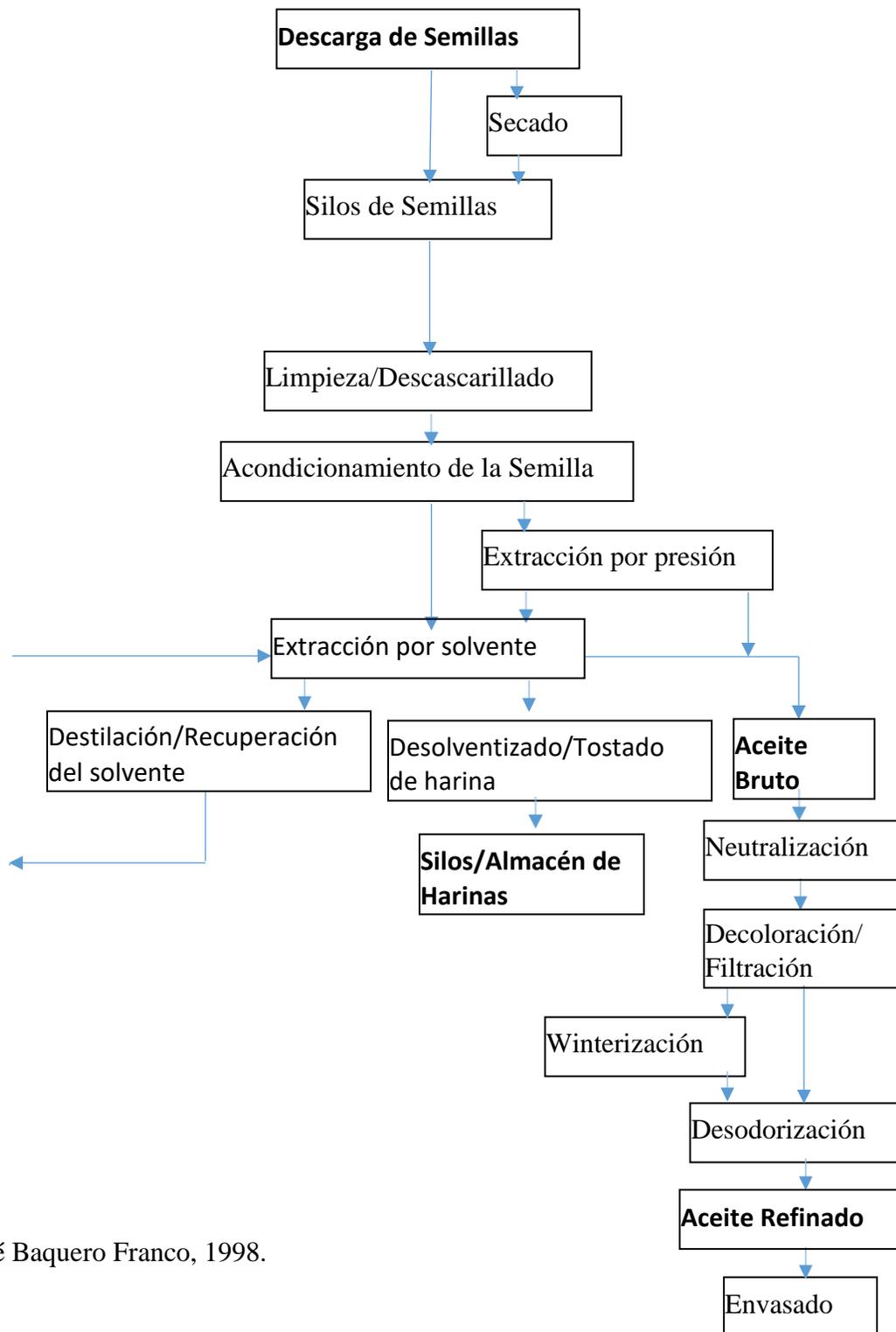
Las semillas oleaginosas, cuando están bien secas, al igual que cualquier otro tipo de semillas, no presentan dificultades de recolección, transporte ni conservación; en efecto, al contrario de las aceitunas, y por tener cáscara bastante dura, resisten bien a las manipulaciones a las que se las someta.

- b) Tratamiento de la semilla, con preparación-acondicionamiento de la misma y la extracción, por medio de un solvente, del aceite que contiene la semilla previamente acondicionada.
- c) Refinación del aceite extraído, ya que en estado bruto el aceite no es apto para el consumo. La refinación incluye varias operaciones básicas: neutralización, decoloración-filtración y desodorización, a estas generalmente se añade alguna otra operación complementaria, como puede ser la Winterización (José Baquero Franco, 1998).

No obstante, en esta investigación no se analiza el proceso de refinación, por tratarse de la obtención de aceite crudo de semillas de Linaza.

En el diagrama 1-1, se muestra el diagrama de bloques general del proceso de producción de aceite a partir de semillas oleaginosas, advirtiendo que luego cada semilla puede exigir alguna particularidad en el proceso general. Aunque dicho diagrama contiene las diferentes fases de todo el proceso, no es usual que en una sola fábrica se abarque la totalidad del proceso, estando separada generalmente la industria extractora, que llega hasta la obtención del aceite bruto, y la industria refinadora, que trata el aceite bruto hasta dejarlo apto para el consumo.

**Diagrama 1-1** Diagrama General de Obtención de Aceite Refinado de Semillas Oleaginosas



**Fuente:** José Baquero Franco, 1998.

## **1.5.1 Almacenamiento de Semillas Oleaginosas**

### **1.5.1.1 Recepción de las semillas**

Una fábrica moderna debe disponer de rápidos y eficaces sistemas de descarga. La llegada de las semillas a la fábrica puede realizarse por: vía marítima, ferrocarril o camiones.

- Descarga de barco; se realiza por lo general por medio de un transporte neumático que, aspirando de la bodega del barco, lleva la semilla hasta una serie de transportadores mecánicos que la distribuyen convenientemente al almacenamiento.
- Descarga de ferrocarril; en las plantas donde se procesan grandes cantidades de semillas, las unidades de descarga de vagones están completamente mecanizadas, tanto en lo que respecta a la descarga misma como a las operaciones de maniobra.
- Descarga de camiones; se realiza generalmente mediante plataformas volcadoras, bien en sentido lateral o longitudinal. Las semillas descargadas por estos medios mecánicos son recogidas en una tolva, y desde esta, mediante un adecuado sistema de transportadores, se llevan a los silos de almacenamiento (Dr. E. Bernardini, 1981).

### **1.5.1.2 Almacenamiento de las semillas**

Las semillas oleaginosas, cuando están bien secas, al igual que cualquier otra semilla, no presentan ningún inconveniente durante su recolección, transporte ni conservación. Pero pueden presentarse dificultades en el almacenamiento de las mismas, debidas a las siguientes causas:

- a) Naturaleza de la semilla. Las semillas pueden presentarse bajo diversas formas: pequeñas esferas, esferas mayores, cuerpos ovales (semillas de Linaza), forma esferoidal recubierta de pelusa o bien bajo forma de harina granulada. Por tanto, la mayoría de las semillas, no tienen especiales problemas de caída de los granos en los silos de celdas verticales.

- b) Humedad de la semilla. Factor muy importante para una buena conservación de la misma. Por lo general se almacena con humedad del 5 al 7 %, máximo del 8 %. Si la semilla llega con una humedad superior al 8 %, se deberá realizar un secado previo al almacenamiento.
- c) Fermentación de la semilla. La posibilidad de fermentación en la masa, es uno de los riesgos más graves que existe. Estos fenómenos se originan a causa de enzimas que contienen las semillas, si las enzimas encuentran condiciones favorables (humedad y temperatura) para el desarrollo de su acción, dan origen a fenómenos de fermentación que pueden producir daños irreparables. Para evitar que se originen fermentaciones, es recomendable almacenar la semilla oleaginosa con una humedad máxima de 6 % y una temperatura inferior a 30 °C (Dr. E. Bernardini, 1981).

### **1.5.2 Secado de Semillas Oleaginosas**

Como se menciona en párrafos anteriores, en el caso que el contenido de humedad de la semilla no sea favorable para su almacenamiento, se debe realizar un secado de la misma, con el fin de evitar la degradación del color, el enranciamiento y la hidrólisis que generaría ácidos grasos libres que pueden deteriorar el producto.

El contenido en agua de una semilla es un factor a tener muy en cuenta durante las diversas etapas del procesado de la misma cuando la extracción de su aceite se hace mediante disolventes; por esta razón, la regulación y el control de la humedad se deben efectuar con equipos adecuados para garantizar que no se superen los límites señalados.

#### **1.5.2.1 Fenómenos físicos que se presentan en el secado por aire de una semilla oleaginosa**

Durante el proceso de secado de una semilla con alto contenido de humedad se presentan tres fenómenos:

- 1) La humedad que se encuentra sobre la superficie de la semilla se evapora al contacto con el aire caliente. Esto es debido a que la presión de vapor en la

superficie del producto es mayor que la presión parcial del vapor de agua en el aire.

- 2) Como la humedad que se encuentra sobre la superficie límite que separa al sólido del aire se elimina, la humedad que se encuentra en el interior de la semilla se difunde hacia la superficie límite externa.
- 3) Otro fenómeno físico que aparece en el proceso de secado es la humedad de equilibrio, la cual se obtiene al someter la semilla en un medio ambiente específico por un periodo de tiempo determinado, esta humedad depende el tipo de grano, de la temperatura y de la humedad relativa del aire que circula. Es así que si el contenido de humedad de la semilla es alto, mucho mayor al contenido de humedad de equilibrio para un medio dado, la semilla libera humedad, en caso contrario si el contenido de humedad de la semilla es menor, entonces absorbe humedad del aire (Dr. E. Bernardini, 1981).

#### **1.5.2.2 Tipos de Secaderos**

##### **➤ Secaderos de celdas verticales**

Se utilizan generalmente para reducir el contenido de humedad de las semillas oleaginosas cuando estas van a ser almacenadas en silos. Estos secaderos están constituidos de una cámara vertical en el interior de la cual están colocadas placas desviadoras en forma tal que obligan a las semillas a realizar un recorrido en sentido vertical al caer por gravedad. En su caída, la semilla encuentra una corriente de aire que produce el secado (Dr. E. Bernardini, 1981).

##### **➤ Secaderos de cilindro rotativo**

Son los más utilizados en la industria que trata las semillas oleaginosas. Su funcionamiento es por corriente paralela, en la que la semilla avanza en la misma dirección que el aire caliente. La finalidad de la corriente paralela es la de evitar que la semilla con bajo contenido en humedad se encuentre con aire a alta temperatura (Dr. E. Bernardini, 1981).

### **1.5.3 Equipos de Transporte y Pesaje**

#### **1.5.3.1 Equipos de transporte**

El traslado de las semillas y harinas de extracción dentro de una industria se efectúa siempre por medio de transportadores de sólidos, los cuales pueden ser transportadores de tipo horizontal, vertical o mixto (Dr. E. Bernardini, 1981).

#### **1.5.3.2 Equipos de pesaje**

Las semillas, al descargarse de los silos para ser procesadas, se pesan previamente. Esta operación es imprescindible para poder calcular con precisión los rendimientos y los costos de transformación. El control del peso de la semilla se efectúa por lo general en la línea alimentación y después de una limpieza. Los equipos normalmente utilizados son básculas volcadoras, cuyo vuelco es provocado por el peso de la semilla (Dr. E. Bernardini, 1981).

### **1.5.4 Preparación de las Semillas Oleaginosas antes de la extracción**

#### **1.5.4.1 Limpieza de las semillas**

La primera de las operaciones de preparación consiste en la limpieza, y su finalidad es la de separar la semilla de cualquier tipo de impureza que la pueda acompañar, ya que, las semillas oleaginosas como cualquier producto agrícola, al llegar a las industrias contienen diversos elementos extraños, como son:

- tierra y barro;
- piedras;
- elementos metálicos;
- cuerpos diversos.

Todos estos elementos deben separarse antes que la semilla pase a ser procesada, ya que se pueden originar graves daños en las instalaciones de proceso, o bien contaminar el producto que se obtiene. Hoy en día no existe un mecanismo capaz de eliminar, por sí mismo, todas las posibles impurezas, y hay que recurrir a diversas máquinas especializadas. Se utilizan máquinas de diferentes tipos: unas basadas en las diferencias de pesos de las semillas y los cuerpos extraños (ventiladores); otras en

la diferencia de tamaños (tamices); otras en la diferencia de forma, y otras en la misma naturaleza de las partículas extrañas (ej. Si se trata de cuerpos de origen ferroso se extraen mediante el uso de electroimanes) (Dr. E. Bernardini, 1981).

#### **1.5.4.2 Acondicionamiento de las semillas**

Incluye todas las operaciones necesarias para poner la semilla en las mejores condiciones que permitan la extracción del aceite. Algunas semillas no precisan tratamientos especiales.

El pretratamiento de las semillas oleaginosas que deben ser sometidas al proceso de extracción de aceite es un factor esencial para obtener un alto rendimiento en aceite sin dañar las características fisicoquímicas y organolépticas del mismo. El pretratamiento de las semillas se compone de tres operaciones fundamentales:

##### **a) Trituración**

En el proceso de extracción del aceite de una semilla oleaginosa, bien sea por el sistema de presión como por solvente, se realiza mucho más rápidamente cuando la semilla se somete a trituración previa o a una laminación.

Como el aceite en las oleaginosas se encuentra en vacuolas dentro de las células de las semillas, tanto las paredes de las células como las vacuolas deben romperse para mejorar la extracción con solvente. Además, diversos investigadores han llegado a la conclusión de que la velocidad de extracción del aceite es inversamente proporcional al cuadrado del espesor de la lámina de la semilla.

##### **b) Calentamiento**

El calentamiento previo de una semilla también favorece el proceso posterior de extracción. La teoría que regula este fenómeno es:

- Las gotitas del aceite, de dimensiones ultramicroscópicas, que están repartidas en la masa de la semilla, por efecto de la elevación de la temperatura su viscosidad disminuye, consecuentemente tienen mayor fluidez y se unen entre ellas para originar gotitas más grandes, que salen más fácilmente de la masa de la semilla.

- El aceite está contenido en una semilla en estado de emulsión con las proteínas, siempre presentes en una semilla oleaginosa. El calentamiento origina la desnaturalización de las proteínas con la consiguiente rotura de la emulsión, y por tanto, la separación del aceite de la masa de semilla.

### c) **Acondicionamiento**

El acondicionamiento tiene por objeto alcanzar el índice de humedad y temperatura que una semilla debe tener para considerar que se halla en las mejores condiciones para ser sometida al proceso de extracción de aceite. La experiencia y la investigación experimental han establecido que una semilla oleaginosa con bajo contenido en agua, 1 – 2 %, cede el aceite con mayor dificultad que cuando tiene una humedad mayor, por ejemplo, 10 %. También en este caso se trata de explicar este fenómeno; la mayor facilidad de extracción del aceite se debe al hecho que el calentamiento de una semilla, acompañado de una humidificación, da lugar a la formación de una película de agua que, envolviendo las partes superficiales de las partículas que componen la semilla, ayuda al proceso de difusión del aceite de la masa hacia la parte externa de la misma (Dr. E. Bernardini, 1981).

#### - **Laminado de semillas**

Las semillas oleaginosas se pueden clasificar en dos grandes grupos:

- de bajo contenido en aceite (menos del 20 %);
- de alto contenido en aceite (más del 20 %).

Normalmente las semillas de bajo contenido en aceite, necesitan de un laminado antes de la extracción de su aceite, con el fin de asegurar un simple pero eficaz aplastamiento de la semilla (Dr. E. Bernardini, 1981).

### **1.5.5 Métodos de Extracción de Aceite Vegetal**

Los tres procesos más comunes para recuperar el aceite a partir de semillas oleaginosas son el prensado hidráulico, el prensado expeller y la extracción con solventes.

### **1.5.5.1 Extracción de aceite por presión**

Partiendo de la semilla limpia y lista para ser utilizada, el primer paso en la obtención de aceites es la trituración de la semilla, la cual se realiza con molinos a martillos, cilindros o espolones. La finalidad de esta etapa es colapsar las estructuras vegetales para que el aceite sea liberado de la semilla.

En resumen, en la extracción de aceite por presión, la semilla oleaginosa previamente acondicionada, es sometida a un tratamiento por prensado para extraer una parte del aceite en ella contenida. Después de ser tratada la semilla en la prensa y haber extraído todo el aceite posible, de la prensa sale un producto denominado turtó o torta proteínica, que contiene la parte del aceite que no ha sido posible extraer.

#### **1.5.5.1.1 Prensado Continúo**

Es realizado de forma común en las prensas *expellers* o tornillo. Estas prensas soportan altas presiones; por lo tanto, generalmente se practica el prensado en dos o tres prensadas, incrementando en cada una de ellas la presión.

En la prensa continua clásica se distinguen las siguientes partes principales:

- alimentación de la semilla;
- sin fin cónico de presión;
- cesta;
- cono regulable de salida del turtó.

Las prensas continuas son máquinas que pueden ser usadas para dos fines bien distintos:

- A) Extraer la máxima cantidad de aceite posible de una semilla que posteriormente no va a ser sometida a ningún otro proceso. Este tipo de prensas deben realizar un trabajo muy fuerte, ya que el aceite residual en el turtó debe ser lo más bajo posible. En general, estas máquinas, con una buena conducción, dejan un residuo de aceite alrededor del 5 %. Por eso, hoy en día, este tipo de elaboración se realiza en pequeñas y viejas industrias extractoras.

B) Extraer una cierta cantidad de aceite, siendo tratado posteriormente el turtó en otro proceso de recuperación del aceite residual. Estas máquinas son utilizadas actualmente en casi todas las industrias que procesan semillas ricas en aceites, ya que se pretende extraer una buena parte del aceite por presión, dejando un turtó que se pueda agotar por solvente. Normalmente, trabajando semillas ricas en aceite, se sigue el siguiente ciclo del proceso:

- preparación y acondicionamiento de las semillas;
- primera presión, hasta llegar a extraer el 76 – 78 % del aceite de la semilla;
- segunda presión, hasta dejar el turtó con un residuo en aceite del 12 – 14 %.

El factor limitante en las posibilidades de estos equipos es que, durante el tratamiento la semilla está sometida a muy fuertes presiones, originándose al mismo tiempo un muy fuerte rozamiento entre la semilla, las espiras del sin fin, el eje del mismo y las paredes de la cesta. Estas dos acciones hacen aumentar fuertemente la temperatura, que puede superar los 160 °C en el interior de la cesta. Este aumento de temperatura es negativo por lo que se refiere a la calidad del aceite a extraer (Dr. E. Bernardini, 1981).

#### ➤ **Depuración del aceite**

De la presión de las semillas oleaginosas se obtienen dos productos: aceite de presión y turtó. El aceite de presión es siempre un producto rico en impurezas: fragmento de semillas, harinillas, etc., y por tanto, no puede almacenarse en estas condiciones, por lo que debe tratarse para eliminar estas impurezas tanto como sea posible a fin de evitar graves inconvenientes en el almacenamiento y posteriores tratamientos. Las operaciones principales para eliminar estas impurezas son:

- Separación de las partículas sólidas gruesas mediante decantadores, tamices vibrantes o centrifugas.
- Separación de los finos que se encuentran en estado de suspensión en el aceite y que no se separan en la primera operación.

Es decir, de la presión continua de las semillas oleaginosas obtendremos los siguientes productos:

- aceite de presión depurado;
- turtós grasos;
- fangos de filtración.

El aceite de presión depurado será sometido a sucesivos tratamientos, de acuerdo con el fin al que van a ser destinados. Los fangos de presión se retornarán al ciclo de presión, mientras que los turtós se utilizan como materia prima para piensos compuestos cuando son de bajo contenido graso, o bien pasan al proceso de extracción por solvente para recuperar el aceite que contienen (Dr. E. Bernardini, 1981).

#### **1.5.5.1.2 Prensado discontinuo**

Este tipo de prensado es el más utilizado desde tiempos antiguos para la extracción de aceites vegetales de consumo humano, para ello se aplicaba presión sobre una masa de vegetales confinados en bolsas, telas, mallas, etc. (Klever Clefa, 2015).

Las prensas más antiguas utilizaron palancas, tornillos, etc.; pero el más utilizado fue el sistema hidráulico.

#### **1.5.5.1.3 Prensado en frío**

La presión en frío, es un modo de extracción exclusivamente mecánico que se realiza a baja temperatura, no mayor a (27 °C) 300 K; preservando de este modo la proporción de ácidos grasos esenciales, vitamina E, antioxidantes naturales y no necesita ningún aditivo (Yeyxon Galarraga, 2015).

#### **1.5.5.1.4 Prensado en Caliente**

Es un proceso que consiste en la obtención de aceites de semillas oleaginosas, similar al tratamiento de las mismas antes del prensado. Este proceso es más exigente desde el punto de vista tecnológico, por lo que el rendimiento de aceite es mayor. Por esta

razón, esta tecnología se utiliza para semillas con porcentaje de aceite superior a 45 % (Nancy Balboa, 2015).

El pensado en caliente es un proceso que puede ser concebido en una o dos etapas (la semilla oleaginosa se prensa dos veces), pero tiene como desventaja que requiere de un mayor proceso de refinado, además que la torta obtenida queda con 10 al 20 % de aceite que puede ser aprovechada, sometiéndola a la acción de un solvente.

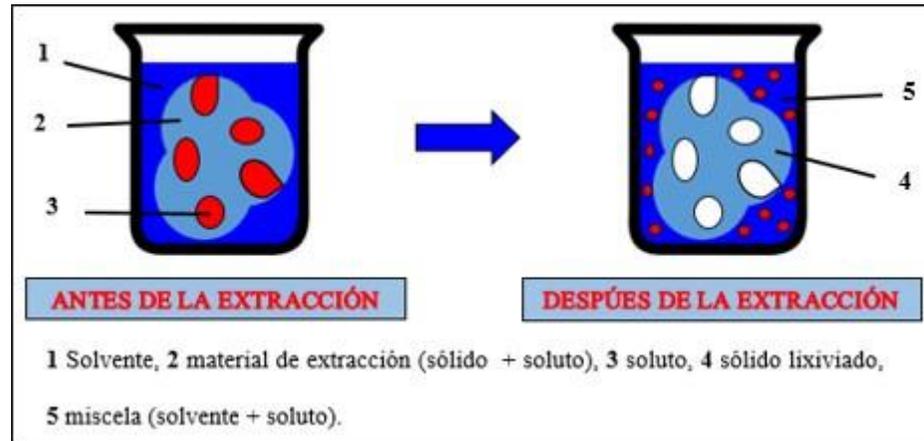
#### **1.5.5.2 Extracción de aceite por solvente**

La extracción es una operación unitaria que consiste en la separación por transferencia de materia, donde se ponen en contacto dos fases inmiscibles con objeto de transferir uno o varios componentes de una fase a otra. Particularmente, cuando la mezcla original está en fase sólida y se pretende separar de ella un componente de otro mediante su contacto con una fase líquida que lo disuelve selectivamente, se trata de una extracción sólido-líquido o lixiviación. El componente o componentes que se transfieren de la fase sólida a la líquida o disolvente, reciben el nombre de soluto, mientras que el sólido insoluble se denomina inerte. Es decir, la difusión de los componentes originales del sólido se produce al poner ambas fases en contacto íntimo (René Espinoza Barazorda, et. al., 2015).

La extracción tiene lugar en dos etapas:

1. Cuando el material sólido a tratar, cede el constituyente soluble (soluto) al disolvente.
2. Lavado o separación de la disolución del resto del sólido.

**Figura 1-2** Extracción Sólido-Líquido



**Fuente:** Elaboración propia a partir de datos de Procesosbio.

#### 1.5.5.2.1 Teoría de la extracción por solvente

La extracción del aceite de una semilla oleaginosa por medio de solvente es un procedimiento que se usa casi en la totalidad de las plantas que trabajan estos productos.

El desplazamiento de uno o varios de los componentes de una mezcla fluida respecto a la masa global de la misma debido a la acción de una fuerza impulsora (diferencia de concentraciones del componente que se desplaza), se conoce como transferencia de materia. Si esta se produce entre fases, puede aprovecharse el fenómeno para obtener la separación de los componentes de una mezcla. El objetivo de esta operación, es la separación de los componentes de una mezcla originalmente homogénea, haciendo posible el paso de alguno de ellos a una segunda fase.

El mecanismo de transferencia de materia, depende de la dinámica del sistema en que se lleva a cabo. Existen dos tipos de mecanismos:

- **Molecular**

En la difusión molecular, la materia se transfiere de una región de alta concentración a una región de una baja concentración durante el movimiento al azar de las moléculas de la sustancia.

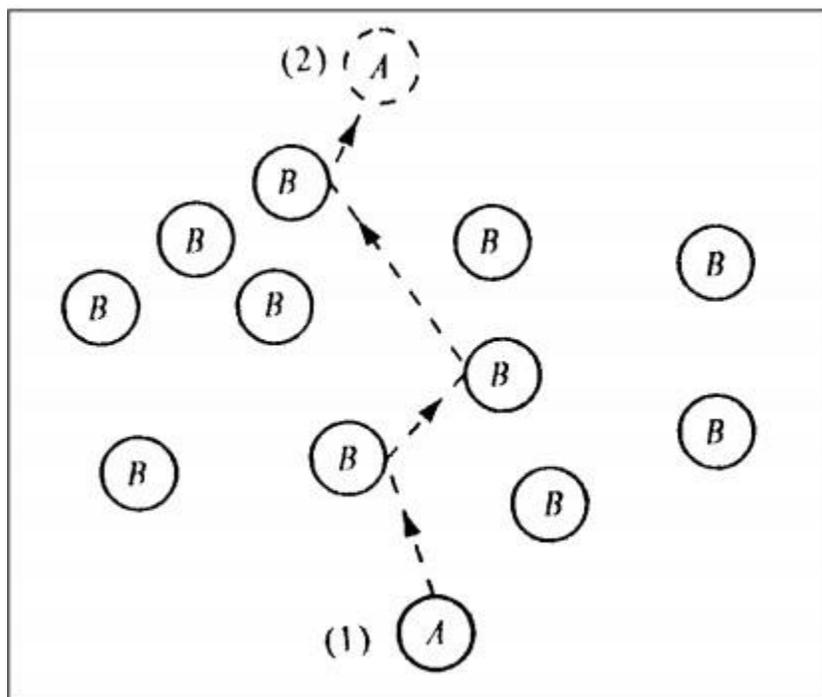
El proceso de transferencia molecular de materia se caracteriza por la siguiente ecuación general:

$$\text{Velocidad de un proceso de transferencia} = \frac{\text{Fuerza impulsora}}{\text{Resistencia}}$$

La ecuación describe la velocidad de transferencia de materia, la cual depende de una fuerza impulsora que en este caso sería la diferencia de concentración, sobre una resistencia, lo que produce una dificultad para transferirse en el medio. Esta resistencia se la denomina difusividad de masa ya que es una constante de proporcionalidad entre la velocidad de transferencia y la diferencia de concentraciones.

Por tanto, la difusión se define como el proceso por el cual la materia es transportada desde una parte de un sistema a otro como resultado de un movimiento molecular. En la Figura 1-3 se muestra esquemáticamente el proceso de difusión molecular (Ingrid Avegno, 2007).

**Figura 1-3** Proceso de difusión molecular



**Fuente:** Ingrid Avegno, 2007.

En la Figura 1-3, se observa que se produce una trayectoria desordenada que la molécula A puede seguir al difundirse del punto (1) al punto (2) a través de las moléculas de B. Si hay un número mayor de moléculas de A cerca del punto (1) con respecto al punto (2), entonces, y puesto que las moléculas se difunden de manera desordenada en ambas direcciones, habrá más moléculas de A difundiéndose de (1) a (2), que de (2) a (1). La difusión neta de A va de una región de alta concentración a otra de baja concentración.

- **Convectiva**

La transferencia de materia por convección es la transferencia entre un fluido en movimiento y una superficie o entre los fluidos y depende tanto de las características dinámicas del fluido como de las propiedades del transporte (Ingrid Avegno, 2007).

#### **1.5.5.2.2 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 pueden ser limitadas por la difusión. Para entender estos procesos se requiere conocimiento sobre la naturaleza y propiedades de los efectos gobernados por la difusión. (Schwartzberg y Chao, 1982. Citado en Florencia Grasso, 2013).

##### **1.5.5.2.2.1 Modelo matemático para la determinación del coeficiente de difusión**

La segunda ley de Fick conocida también como la ecuación de difusión, es una ecuación diferencial que indica cómo la concentración de una sustancia se difunde en función de la distancia y el tiempo. Por medio de esta ley se puede obtener modelos matemáticos que sirven para la determinación del coeficiente de difusión efectivo. La difusión molecular puede ser definida por la segunda ley de Fick para estado no estacionario como:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad \text{---} \quad (\text{Ec. 1 - 1})$$

Donde:

$C$  = Concentración de soluto a la distancia  $z$  del origen y al tiempo  $\theta$ .

$\theta$  = Tiempo.

$D$  = Coeficiente de difusión, cantidad de material que pasa por un plano de unidad de área en una unidad de tiempo debido a un 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 Balbin Y. et al., 2015).

- $D$  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 placa infinita está dada por (Cranck, 1957 citado en Balbin Y. et al., 2015), que corresponde al flujo en una sola dirección, solución correspondiente a las condiciones límite de:

$$C = 0, \quad z \pm l, \quad q \geq 0, \quad C = C_0, \quad -l < z < l$$

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

Quedando la solución representada en la ecuación (1-2).

$$\frac{q}{q_0} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{n=\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} e^{-\frac{(2n+1)^2 D \theta}{l^2}} \quad Ec. (1-2)$$

Donde:

$\theta$  = Tiempo de extracción, s.

$q_\theta$  = Cantidad de aceite por unidad de sólido a  $q$  min, g/g s.s.

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

$2l$  = Espesor 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 suficiente para los cálculos prácticos (Treybal, 1990 citado en Balbin Y. et al., 2015).

$$\frac{q_\theta}{q_0} = \frac{8}{\pi^2} \frac{D\theta\pi^2}{(2l)^2} + \frac{1}{9} \frac{9D\theta\pi^2}{(2l)^2} + \frac{1}{25} \frac{9D\theta\pi^2}{(2l)^2} \dots \quad (Ec. 1 - 3)$$

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:

$$\frac{q_\theta}{q_0} = \frac{8}{\pi^2} e^{-\frac{\pi^2 D \theta}{(2l)^2}} \quad (Ec. 1 - 4)$$

Entonces:

$$\log \left( \frac{q_\theta}{q_0} \right) = a - 4,286 \frac{D}{(2l)^2} \theta \quad (Ec. 1 - 5)$$

Donde:

$a$  = Constante obtenida a partir de regresión lineal de valores experimentales.

### 1.5.5.2.3 Factores que influyen en la velocidad de extracción

- **Tamaño de la partícula.-** Es un factor importante, porque afecta a la velocidad de extracción de diversas maneras. Cuanto más pequeño es el tamaño de la partícula debido a la trituración, mayor es la superficie de contacto y más corta la longitud de los poros, lo que se traduce en una mayor velocidad de transferencia. Sin embargo, tamaños excesivamente pequeños puede generar compactación de la masa reduciendo la superficie de contacto y consecuentemente dificultando la extracción y circulación del líquido. Por lo tanto, generalmente se aconseja que la gama de tamaños de partícula sea pequeña y homogénea, de tal manera que

requieran el mismo tiempo de extracción, y en particular, evitar la producción de gran cantidad de material fino, que puede alojarse en los intersticios de las partículas mayores e impedir el flujo del solvente (J.M. Coulson, 1981).

- **Tipo de solvente.-** El solvente elegido debe ser un solvente lo más selectivo posible, con una viscosidad suficientemente baja, que le permita fluir con facilidad. Generalmente, se utiliza un solvente relativamente puro, pero a medida que transcurre la extracción, la concentración de soluto aumenta y la velocidad de extracción disminuye progresivamente; debido a la disminución del gradiente de concentración y al aumento de la viscosidad de la disolución (J.M. Coulson, 1981).
- **Temperatura de extracción.-** Un aumento de la temperatura favorece la solubilidad porque disminuye la viscosidad del líquido y aumentan los coeficientes de transferencia de materia. El límite superior se fija atendiendo a criterios de calidad del producto, criterios económicos y de seguridad con respecto al solvente. Por lo general, la extracción se realiza a la temperatura de ebullición del solvente de modo que se produce la mayor solubilidad del soluto en el disolvente (J.M. Coulson, 1981).
- **Tiempo de extracción.-** Es un factor muy importante porque influye directamente sobre la cantidad de aceite extraído de una semilla, por lo tanto debe ser el suficiente para extraer los compuestos de interés. El tiempo de extracción, está relacionado con el tamaño de la partícula y la calidad del solvente para un determinado rendimiento (Maribel Mamani, 2016).
- **Agitación del fluido.-** Es importante porque aumenta la difusión de remolino, provocando un incremento en la transferencia de material desde la superficie de las partículas hacia la masa de la disolución. Además, la agitación de las suspensiones de pequeñas partículas evita la sedimentación, y hace que se utilice de una forma más eficaz la superficie de contacto (J.M. Coulson, 1981).

#### **1.5.5.2.4 Procesos de extracción por percolación e inmersión**

La extracción de aceite de una semilla oleaginosa por medio de lavado de solvente se puede realizar de tres maneras:

##### **a) Extracción por percolación**

Este procedimiento se lleva a cabo mediante una lluvia de solvente de manera tal que llegue a toda la masa, pero sin llenar todos los espacios vacíos existentes entre las semillas. En otras palabras, se realiza una verdadera percolación cuando el solvente envuelve a todas las partículas de la semilla con una película de líquido en continuo recambio. En este procedimiento, la velocidad del solvente en contacto con la superficie de la semilla es grande, ya que la película del líquido escurre velozmente sobre las partículas por efecto de la fuerza de la gravedad; por tanto, para poder realizar el proceso de percolación es necesario que las partículas de la semilla tengan un tamaño que permita un fácil drenaje del solvente a través de la masa. Resumiendo, se trata de una extracción en diversas etapas, aunque sea de modo continuo, y nunca podrá realizarse un perfecto lavado en contracorriente (George C., 2015).

##### **b) Extracción por inmersión**

Este procedimiento se realiza, por el contrario, cuando la masa de la semilla va inmersa completamente en el solvente, incluso si este está en movimiento. En este proceso, al encontrarse la semilla inmersa en el solvente, la velocidad de recambio del solvente sobre la superficie de las partículas es necesariamente lenta, incluso si circula rápidamente. El proceso por inmersión puede realizarse fácilmente aunque la semilla haya sido reducida a partículas de pequeños tamaños. Resumiendo, al trabajar por el contrario, con baja velocidad de paso del solvente, puede realizar una extracción continua con un perfecto lavado en contracorriente sin necesidad de recirculaciones.

En conclusión, el proceso de extracción por percolación es adecuado para tratar semillas oleaginosas que han sido bien preparadas, con bajos porcentajes de finos, mientras que el procedimiento por inmersión tiene éxito, en los casos en que la

semilla oleaginosa se presenta en pequeñas partículas y con alto porcentaje de finos (George C., 2015).

### **c) Extracción mixta percolación – inmersión**

El dilema entre uno u otro procedimiento está resuelto en el aparato Soxhlet, donde se realiza una extracción mixta percolación – inmersión con resultados muy buenos, y tanto es así que este aparato se utiliza para la determinación analítica del contenido de una sustancia grasa (George C., 2015).

### **1.5.5.3 Extracción supercrítica**

La extracción con fluidos supercríticos es una técnica que estudia las propiedades solvatantes de un fluido por encima de su punto crítico. Es una alternativa muy interesante para la obtención y purificación de compuestos muy específicos sin utilizar compuestos tóxicos. Hoy en día es un método muy utilizado en la extracción de aceites en semillas con alto contenido del mismo.

Un fluido supercrítico, es un gas o líquido en condiciones de presión y temperatura a las de su punto crítico. Se considera punto crítico aquél en el que la fase líquida y vapor se vuelven indistintas, esto es, la fase crítica, determinada normalmente por los parámetros: presión crítica, temperatura crítica y densidad crítica. En esta fase, el fluido tiene propiedades típicas que lo hacen especialmente indicado como solvente de extracción.

El dióxido de carbono es el más usado por tener una presión crítica moderada (7,2 MPa) y baja temperatura crítica (31°C), siendo de elección para la extracción de compuestos termolábiles. Sin embargo, el CO<sub>2</sub> también tiene sus limitaciones, sobre todo para la extracción de compuestos polares (Alejandra Hernández, 2017).

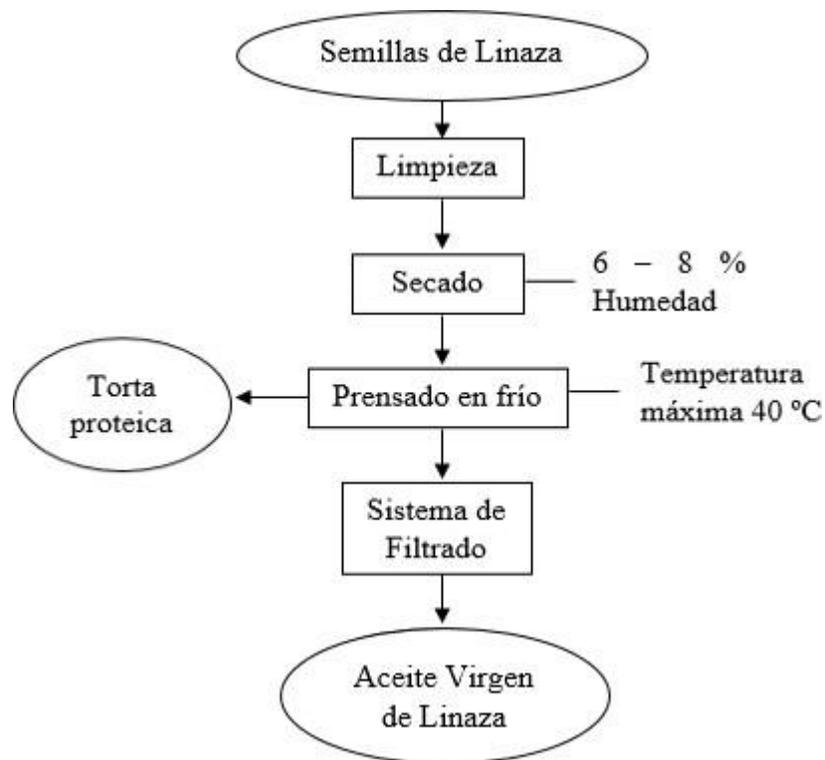
## **1.5.6 Procesos Industriales de Obtención de Aceite de Linaza**

### **1.5.6.1 Obtención de aceite de Linaza por prensado discontinuo o prensado en frío**

Las semillas de Linaza son extremadamente sensibles al calor, así que los operarios tienen que enfriar la prensa durante el proceso para compensar el calor que se genera

durante el prensado. Los aceites naturales y sin conservantes como estos deben manipularse con cuidado, puesto que la exposición al aire los estropea prematuramente. El plástico es translúcido, por tanto estos aceites se embotellan en vidrio oscuro ya que también son sensibles a la luz. Las botellas se sellan con un tapón dosificador. Sin conservantes, los aceites de semilla de Linaza tienen que estar refrigerados e incluso así, apenas duran unos meses pero valen la pena, porque tienen mejor sabor que los aceites elaborados al por mayor.

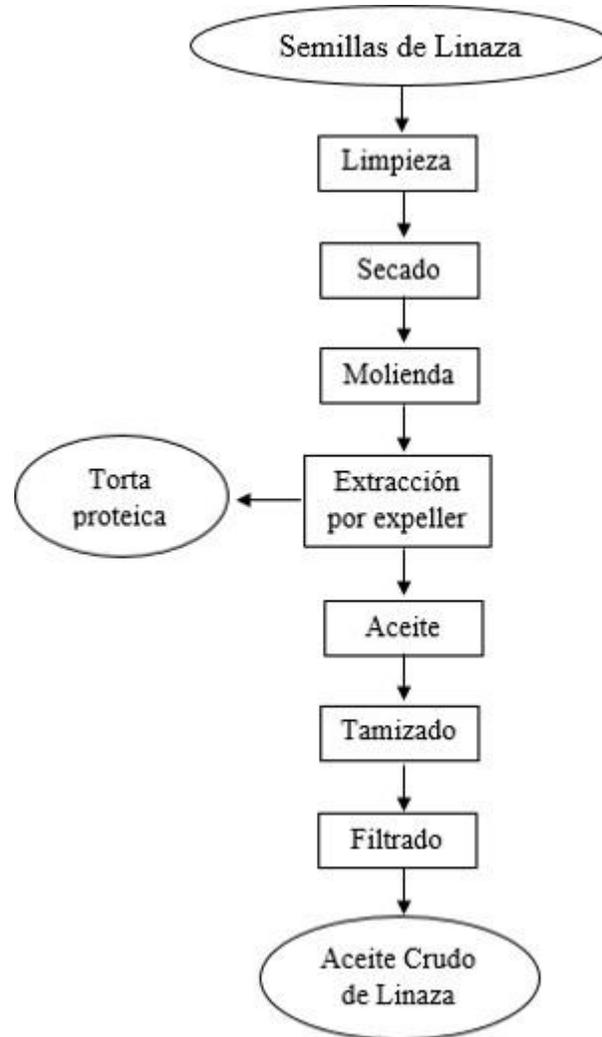
**Diagrama 1-2** Extracción de Aceite de Linaza por prensado discontinuo o prensado en frío



**Fuente:** J. M. Blanco et. al, 2015.

### 1.5.6.2 Obtención del aceite de Linaza por prensado continuo

**Diagrama 1-3** Extracción de Aceite de Linaza por prensado continuo

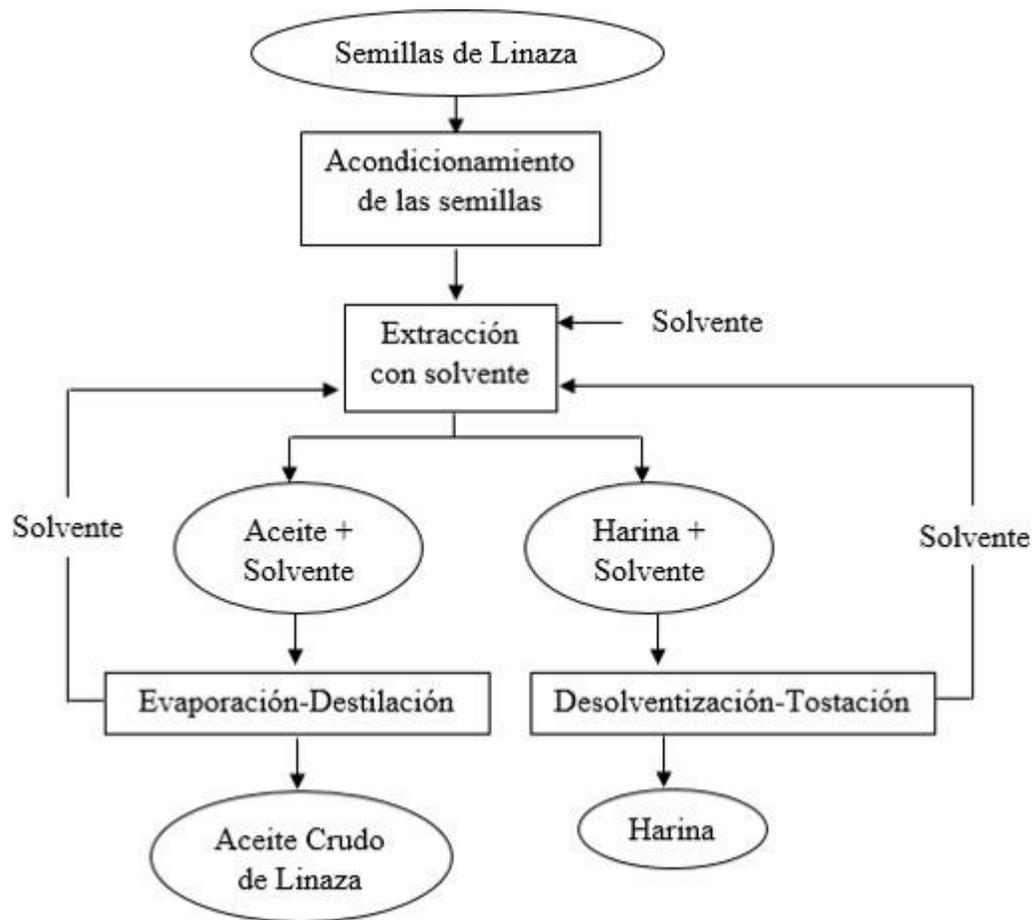


**Fuente:** Danger Tabio García, et. al, 2017.

### 1.5.6.3 Extracción de aceite de Linaza por solventes

Es un método que permite obtener un alto porcentaje de aceite recuperado, por eso se ha convertido en el método más popular de separación del aceite, ya que se recupera casi todo el aceite, dejando menos del 1 % de aceite residual en la materia prima; por esta razón se lo puede aplicar directamente a los materiales de bajo contenido en aceite crudo.

**Diagrama 1-4** Extracción de Aceite de Linaza mediante extracción por solvente



**Fuente:** Irina Acosta y Grecia Torres, 2015.

### 1.5.7 Obtención en Laboratorio de Aceite de Linaza mediante extracción por solvente

A nivel analítico se emplean diversas técnicas, siendo la más usada tradicionalmente la extracción en Soxhlet.

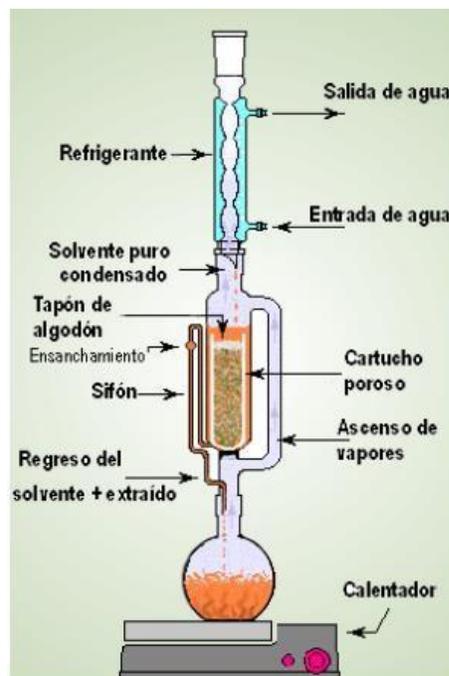
#### 1.5.7.1 Extracción Soxhlet

La extracción Soxhlet fue diseñada por el químico alemán Franz Von Soxhlet en 1879 (Gerardo Martínez, 2013). Es una operación que consiste en la transferencia de masa, donde un solvente orgánico, extrae selectivamente en este caso el aceite de la semilla de Linaza.

El extractor Soxhlet es un equipo que suele utilizarse en experimentos de laboratorio, aunque en instalaciones de pequeña capacidad y otros de funcionamiento análogo también se aplica (Simons, 2010). Lo que hace el extractor Soxhlet es realizar un sin fin de extracciones de manera automática, con el mismo solvente que se evapora y condensa llegando siempre de manera pura al material. La extracción Soxhlet se fundamenta en las siguientes etapas (Carlos Núñez, 2007):

- Colocación del solvente en un balón,
- ebullición del solvente que se evapora hasta un condensador a reflujo,
- el condensado cae sobre un recipiente que contiene un cartucho poroso con la muestra en su interior,
- ascenso del nivel del solvente cubriendo el cartucho hasta un punto en que se produce el reflujo que vuelve el solvente con el material extraído al balón,
- se vuelve a producir este proceso la cantidad de veces necesarias para que la muestra quede agotada. Lo extraído se va concentrando en el balón del solvente.

**Figura 1-4** Extracción Soxhlet



**Fuente:** Carlos Núñez, 2007.

## CAPÍTULO II PARTE EXPERIMENTAL

### 2.1 DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE LA MATERIA PRIMA

La materia prima utilizada en la presente investigación es la semilla de Linaza (*Linum usitatissimum* L.) variedad marrón, producida en el departamento de Tarija.

Los análisis fisicoquímicos para la materia prima se realizaron en el laboratorio del Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo “CEANID”, dependiente de la Universidad Autónoma “Juan Misael Saracho”. Los análisis realizados a la semilla de Linaza procedente de la comunidad tarijeña Yesera Sud, fueron los siguientes:

- Determinación porcentual de humedad.
- Determinación porcentual de proteína total.
- Determinación porcentual de materia grasa.
- Determinación porcentual de ceniza.
- Determinación porcentual de hidratos de carbono.
- Determinación porcentual de fibra.

Los resultados del análisis fisicoquímico que se le realizó a la materia prima se muestran en la tabla II-1.

**Tabla II-1**

#### Composición Fisicoquímica de la semilla de Linaza

Parámetros	% p/p
Humedad	6,12
Proteína total (Nx5,30)	18,86
Grasa	34,84
Ceniza	2,81
Hidratos de carbono	11,31
Fibra	26,00

**Fuente:** Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo “CEANID”, 2018.

## 2.2 DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

### 2.2.1 Selección del método experimental de extracción de Aceite de Linaza

Para la selección del método experimental de extracción de Aceite de Linaza, se consideran los distintos métodos citados en párrafos anteriores. Asimismo, se asigna una calificación de acuerdo a la escala de Likert. En la tabla II-2 se observan las calificaciones ponderadas que permiten seleccionar el método, siendo el método adecuado aquel que acumule el mayor puntaje.

**Tabla II-2**

#### Escala de Calificación Likert

Escala de Puntuación	Puntuación
Excelente	5
Muy buena	4
Buena	3
Regular	2
Mala	1

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla II-3**

#### Selección del método experimental de extracción de Aceite de Linaza

Criterio evaluado	Comentarios del evaluador	Calificación		
		Extracción por prensado	Extracción con solvente (Soxhlet discontinua)	Extracción con solvente (Extracción percolación e inmersión)
Aplicabilidad del método	La extracción por prensado es utilizada por pequeñas empresas especializadas. La extracción Soxhlet presenta buena eficacia, utilizada en pequeñas escalas. La extracción continua no es viable a escala laboratorio.	4	5	2

Disponibilidad de Equipamiento	No se dispone de prensas discontinuas o continuas, que permitan la extracción del aceite por prensado. Se dispone de equipo Soxhlet, más no de aquellos necesarios para realizar una extracción por percolación o inmersión.	1	5	1
Rendimiento del método	Como se mencionó anteriormente, el método de extracción de aceite a partir de oleaginosas por prensado presenta rendimientos bajos en comparación con la extracción con solventes (en especial por Soxhlet discontinua).	3	5	4
Temperatura de extracción	En la extracción de aceite por prensado la temperatura no debe sobrepasar los 45 °C. La extracción Soxhlet discontinua, permite trabajar hasta temperaturas de ebullición del solvente. La extracción continua opera a bajas temperaturas.	2	4	3
Costos	Los equipos para el método de extracción por prensado son relativamente caros (especialmente la prensa de tornillo). El equipo Soxhlet tiene un menor costo que para la extracción con extractor continua. La extracción continua es un	3	4	2

	proceso de alto costo de inversión.			
Tiempo de extracción	En la extracción de aceite por prensado, el tiempo de extracción es mucho menor que en la extracción con solventes. El tiempo de extracción con el equipo Soxhlet puede ser hasta de 10 horas según el tipo de oleaginosa. La extracción continua, requiere un tiempo de extracción más largo.	5	4	3

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla II-4**

**Matriz de decisión para el método experimental de extracción de Aceite de Linaza**

Parámetros	Selección del método experimental de extracción de Aceite de Linaza						
	Valoración porcentual %	Extracción por prensado		Extracción con solvente (Soxhlet discontinua)		Extracción con solvente (Extracción percolación e inmersión)	
		Calif.	Pond.	Calif.	Pond.	Calif.	Pond.
Aplicabilidad del método	25	4	20	5	25	2	10
Disponibilidad de Equipamiento	20	1	4	5	20	1	4
Rendimiento del método	15	3	9	5	15	4	12
Temperatura de extracción	15	2	6	4	12	3	9
Costos	15	3	9	4	12	2	6
Tiempo de extracción	10	5	10	4	8	3	6
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>		<b>58</b>		<b>92</b>		<b>47</b>

Según los resultados de la matriz de decisión, el método experimental más conveniente para la extracción de aceite crudo de Linaza, es la extracción Soxhlet discontinua, por tener mayor aplicabilidad, disponibilidad de equipamiento y ser la más efectiva a escala laboratorio. La descripción de este método se realizó en la sección 1.5.7.1.

### 2.2.2 Selección del solvente utilizado en el proceso de extracción de Aceite de Linaza

En la tabla II-5, se utiliza el mismo método de calificación según la escala de Likert.

**Tabla II-5**

#### Selección del solvente para el proceso de extracción de Aceite de Linaza

Criterio evaluado	Comentarios del evaluador	Calificación		
		Hexano	Éter de petróleo	Etanol
Selectividad	El solvente orgánico que muestra mayor selectividad que otros, es el hexano. El etanol atrapa adicionalmente componentes.	5	4	2
Rendimiento	Para el caso particular de extracción, el hexano presenta relativamente un mayor rendimiento que el éter de petróleo y este mucho más que el etanol.	5	4	2
Costos y disponibilidad	El etanol, es el más barato de los tres solventes, por no ser una sustancia controlada. Le sigue el éter de petróleo, el cual a pesar de ser una sustancia controlada es más accesible que el hexano.	1	4	5
Recuperación del solvente	El hexano puede recuperarse casi en su totalidad, por simple proceso de destilación, así también el éter de petróleo. En cambio el etanol, es difícil de separar.	5	5	2

**Fuente:** Elaboración propia.

Tabla II-6

**Matriz de decisión para el solvente utilizado en el proceso de extracción de Aceite de Linaza**

Parámetros	Selección del solvente utilizado en el proceso de extracción de Aceite de Linaza						
	Valoración porcentual %	Hexano		Éter de petróleo		Etanol	
		Calif.	Pond.	Calif.	Pond.	Calif.	Pond.
Selectividad	40	5	40	4	32	2	16
Rendimiento	20	5	20	4	16	2	8
Costos y disponibilidad	25	1	5	4	20	5	20
Recuperación del solvente	15	5	15	5	15	2	8
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>		<b>80</b>		<b>83</b>		<b>52</b>

**Fuente:** Elaboración propia.

Después de analizar los diferentes criterios tomados en cuenta para la selección del solvente orgánico utilizado en la extracción de aceite de semillas de Linaza mediante el método Soxhlet, los resultados obtenidos en la matriz de decisión indican que, el Éter de Petróleo es solvente más adecuado para la extracción del aceite de semillas de Linaza a escala laboratorio, por tener una buena selectividad y rendimiento, por ser fácil de recuperar entre otros aspectos importantes como la disponibilidad.

### 2.3 DISEÑO FACTORIAL

El diseño factorial o experimental se refiere al proceso para planear el experimento, de tal forma que se recaben datos adecuados. Su objetivo es el de obtener información acerca del fenómeno estudiado, información veraz, clara y suficiente. El diseño del experimento debe definir las variables que vamos a controlar (factores); la o las variables que vamos a probar (factores del diseño y sus niveles); los objetos a los cuales se les medirá el efecto del o los factores del diseño; y las variables que vamos a medir como respuesta al efecto de los tratamientos sobre los objetos de estudio (variables respuesta) (José Montoya, et. al, 2011).

### 2.3.1 Selección de Variables del Proceso Tecnológico

La etapa principal del proceso de obtención de Aceite de Semillas de Linaza mediante extracción por solvente es la extracción, en este caso particular con equipo Soxhlet, misma que nos permite controlar variables que influyen en la velocidad de extracción, tales como: el tamaño de la partícula y tiempo de extracción. Generalmente la temperatura de extracción, es la temperatura de ebullición del solvente. Por lo tanto, las variables que se varían para conocer cuáles son los parámetros que permiten el mayor rendimiento de aceite en el producto final, son tamaño de partícula y tiempo de extracción, mismos que según referencia bibliográfica son alrededor de 0,5 mm y 2 h respectivamente (Héctor Cid Silva, 2010).

### 2.3.2 Diseño factorial 3k

El diseño factorial 3k considera a k como los factores con 3 niveles cada uno y tiene  $3^k$  tratamientos.

Existen varias formas de escribir el modelo del experimento factorial, uno de ellos es el modelo de regresión, mismo que relaciona la variable respuesta con los niveles de los factores.

La Tabla II-7 muestra los niveles de variación de las variables del proceso de obtención de aceite de Linaza mediante extracción por solvente, también llamadas factores.

**Tabla II-7 Codificación de las variables**

Variables	Nivel		
	Alto	Intermedio	Bajo
Tamaño de partícula (mm)	A	B	C
Tiempo de extracción (horas)	a	b	c

**Fuente:** Elaboración propia.

El número de experimentos a realizar son:

$$3^k$$

Donde:

3: Número de niveles k:

Número de factores

El número de experiencias es:  $3^2 = 9$

En total, incluyendo las repeticiones en cada experimento, se tiene:

Número de experiencias es:  $9 \times 2 = 18$  experimentos.

El diseño factorial tiene como finalidad, estudiar todas las posibles combinaciones que se pueden dar entre las variables que se someten a prueba.

**Tabla II-8**

**Diseño factorial para el proceso de extracción**

N° de Exp.	FACTORES		RESPUESTA I	RESPUESTA II
	Tamaño (T)/mm	Tiempo (t)/h	Aceite (%)	Aceite (%)
1	A	c	R1	R1
2	A	b	R2	R2
3	A	a	R3	R3
4	B	c	R4	R4
5	B	b	R5	R5
6	B	a	R6	R6
7	C	c	R7	R7
8	C	b	R8	R8
9	C	a	R9	R9

**Fuente:** Elaboración propia.

**R:** Variable respuesta a medir.

## **2.4 PROCEDIMIENTOS Y TÉCNICAS EMPLEADOS PARA LA OBTENCIÓN DE RESULTADOS**

### **2.4.1 Equipos y materiales utilizados en la extracción del Aceite de Linaza**

El presente proyecto de investigación se realizó en las instalaciones del Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo “CEANID” y el Laboratorio de Operaciones Unitarias “LOU”, ambos dependientes de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

### 2.4.1.1 Descripción de los equipos utilizados

#### ➤ **Extractor Soxhlet**

Es un equipo, compuesto por una serie de materiales (refrigerante, balón, calentador, extractor y mangueras). Se utilizó para la extracción de la materia grasa presente en las muestras de semilla de Linaza molida.

**Figura 2-1** Extractor Soxhlet



**Fuente:** Elaboración propia.

#### ➤ **Calentador eléctrico**

Es un aparato de sobremesa, que posee un elemento de calefacción eléctrica y un soporte universal incluido, se emplea para calentar recipientes con líquidos.

**Figura 2-2** Calentador eléctrico



**Fuente:** Elaboración propia.

➤ **Tamiz Vibratorio**

Es un equipo compuesto por un juego de mallas de la serie Tyler de tamaños 4, 2, 1, 0,5, 0,25, 0,063 mm y una bandeja de recipiente de muestra. Este equipo se utilizó en la clasificación de tamaños de la muestra de semillas de Linaza molida.

**Figura 2-3 Tamiz Vibratorio**



**Fuente:** Elaboración propia.

➤ **Balanza Analítica**

Consta de una pantalla digital, y tiene una precisión de 0,001 g. Esta balanza se utilizó en el pesaje de las muestras que fueron sometidas a la extracción del aceite de semillas de Linaza.

**Figura 2-4** Balanza Analítica



**Fuente:** Elaboración propia.

➤ **Estufa**

Estufa de secado serie, con cámara de acero inoxidable y convección forzada para realizar un secado rápido y uniforme. Tiene una función de rampa para temperatura, un dispositivo de seguridad ajustable con alarma visual, y ventilación ajustable, mediante un conducto de evacuación y tapa corrediza de ventilación delantera. Tiempos de recuperación rápida después de abrir la puerta o luego de un cambio de aire. Tiene un rango de temperatura que va desde 5 a 300 °C.

Este equipo se utilizó para eliminar las trazas de solvente del producto final, y en la desolventización de la harina.

**Figura 2-5** Estufa

**Fuente:** Elaboración propia.

➤ **Licadora Industrial**

Licadora de alimentos de alta rotación, trabaja en alta velocidad (aproximadamente 22 000 rpm en vacío), está provista de tres aspas metálicas, accionadas por un motor eléctrico de 900 W. Fue utilizada para la reducción de tamaño de la materia prima, con el objetivo de aumentar la superficie de contacto para facilitar el proceso de extracción.

**Figura 2-6** Molino eléctrico

**Fuente:** Elaboración propia.

### 2.4.1.2 Material de laboratorio utilizado

En la siguiente tabla II-9 se detalla el material utilizado.

**Tabla II-9 Material de laboratorio**

Material	Especificación	Cantidad
Extractor Soxhlet	Columna mediana	2
Refrigerante	-	2
Mangueras	-	3
Balón	250 ml	2
Bandejas	-	7
Pinza doble nuez	-	2
Vaso de precipitación	250 ml	1
Tubos de ensayo	-	4
Papel filtro	Pliegue	5
Espátula	-	1
Guantes	-	10
Barbijos	-	5
Frasco de vidrio	-	1

**Fuente:** Elaboración propia.

### 2.4.1.3 Reactivo

- Éter de Petróleo.- Utilizado como solvente en la extracción del aceite de semilla de Linaza.

A continuación en la tabla II-10 se exponen las especificaciones del mismo.

**Tabla II-10 Especificaciones del Éter de Petróleo**

Producto: Éter de petróleo para análisis A.C.S.	N° CAS: 8032-32-4
Propiedades físicas y químicas	
Aspecto	Líquido incoloro
Olor	Característico a hidrocarburos y gasolina
Punto de fusión	-40 °C
Punto de ebullición	35 – 60 °C
Punto de inflamación	250 °C
Presión de vapor	400 mmHg a 20 °C
Densidad relativa (agua = 1)	0,67 a 20 °C
Densidad relativa de vapor (aire = 1)	3,9

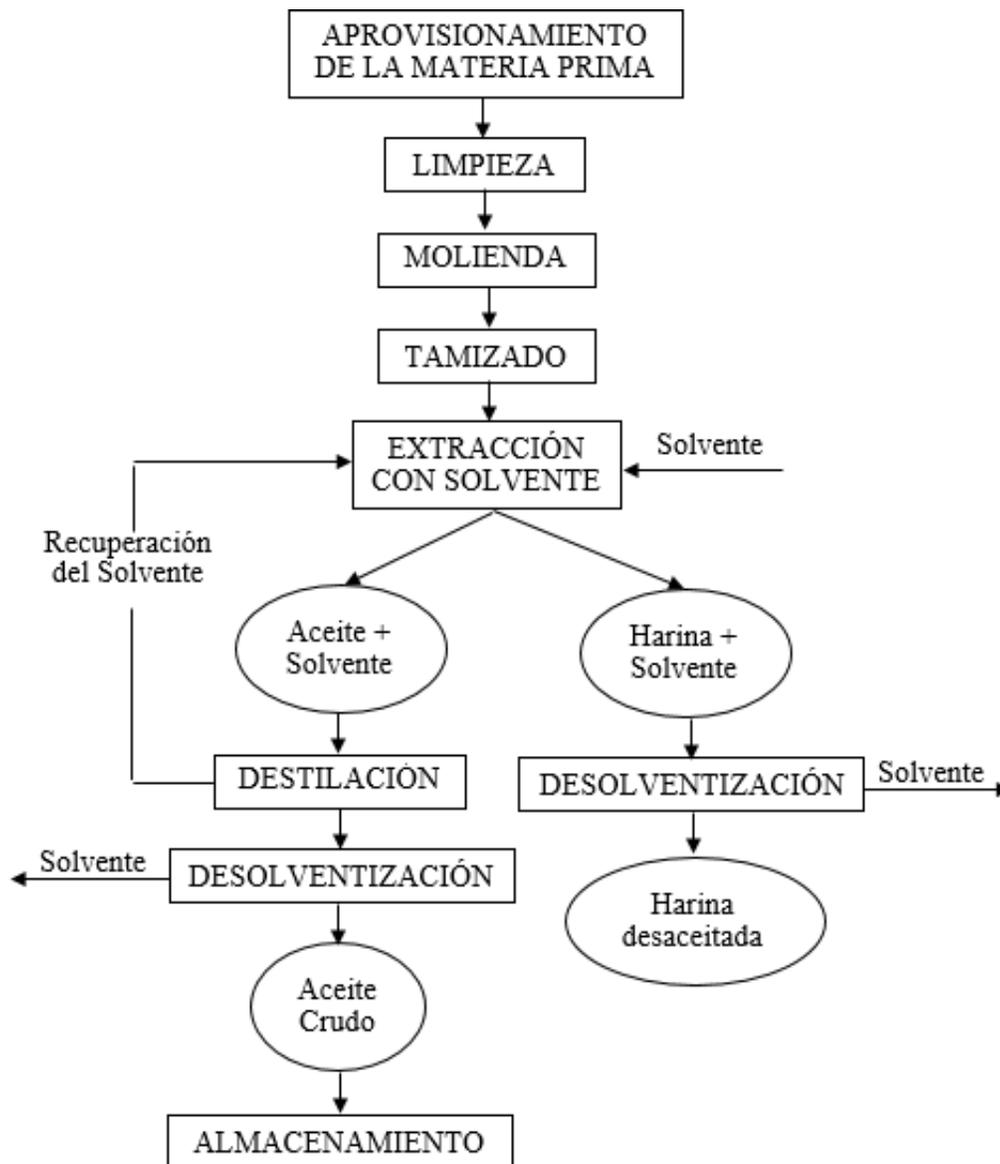
Solubilidad en agua	0,04% a 20 °C
Temperatura de auto-inflamación	288 °C
<b>Indicaciones de Peligro</b>	
Extremadamente inflamable. Causa irritaciones, quemaduras y daños al sistema nervioso. Puede provocar efectos sobre el ambiente a largo plazo.	

**Fuente:** Sintorgan, reactivos analíticos, 2018.

#### **2.4.2 Descripción del proceso tecnológico experimental de obtención de Aceite de Linaza**

El proceso de extracción a escala laboratorio del aceite de Linaza se presenta en el siguiente Diagrama 2-1.

**Diagrama 2-1** Diagrama de Bloques del Proceso de Obtención de Aceite de Linaza



**Fuente:** Elaboración propia.

#### 2.4.2.1 Aprovechamiento de la materia prima

La materia prima utilizada en la parte experimental, está constituida por las semillas de Linaza (*Linum usitatissimum* L.) variedad marrón, misma que se cultiva en la Comunidad de Yesera Sud, lugar donde se acudió para su recolección con el objetivo de conseguir semillas recientemente cultivadas.

La materia prima fue recolectada una vez cosechadas las semillas y veteadas (con el objetivo de separar los restos de las vainas que contenían a las semillas), se recolectó en bolsas de polietileno. La cantidad muestreada fue de 4 kg.

**Figura 2-7** Semillas de Linaza recolectada



**Fuente:** Elaboración propia.

**2.4.2.2 Limpieza.-** De forma manual, quitar las impurezas presentes.

**Figura 2-8** Separación de impurezas de la materia prima



**Fuente:** Elaboración propia.

**2.4.2.3 Molienda.-** Antes de llevar a cabo esta etapa, las semillas de Linaza deben contener un porcentaje de humedad adecuado para esta operación física (menor al 10 %). Por lo tanto, una vez comprobado su bajo porcentaje de humedad (6,12 %) se procede a moler las semillas (sin un proceso previo de secado). En un molino eléctrico de cuchillas (licuadora industrial), se muelen 230 g de semillas por un tiempo de 1 min, con intervalos de descanso de cada 15 seg, para evitar el calentamiento de la muestra; hasta que alcance el tamaño de partícula requerido para el proceso.

**Figura 2-9** Molienda de la materia prima



**Fuente:** Elaboración propia.

**2.4.2.4 Tamizado.-** Se someten las semillas molidas a un análisis por tamizado, utilizando diferentes tamices con tamaños de mallas desde 2, 1, 0,5, 0,25 y 0,063 mm, cada uno de ellos corresponden a los números 9, 16, 32, 60 y 250 de la serie Tyler respectivamente. El procedimiento realizado para este análisis fue el siguiente:

Una vez ordenados los tamices de forma decreciente de acuerdo al tamaño de malla, se tomó una muestra de 220 g de semilla molida, misma que se introdujo en la zaranda y se tamizó durante un tiempo de 10 min. Los resultados obtenidos durante el análisis granulométrico se muestran en la tabla II-11 y el gráfico II-1.

Tabla II-11

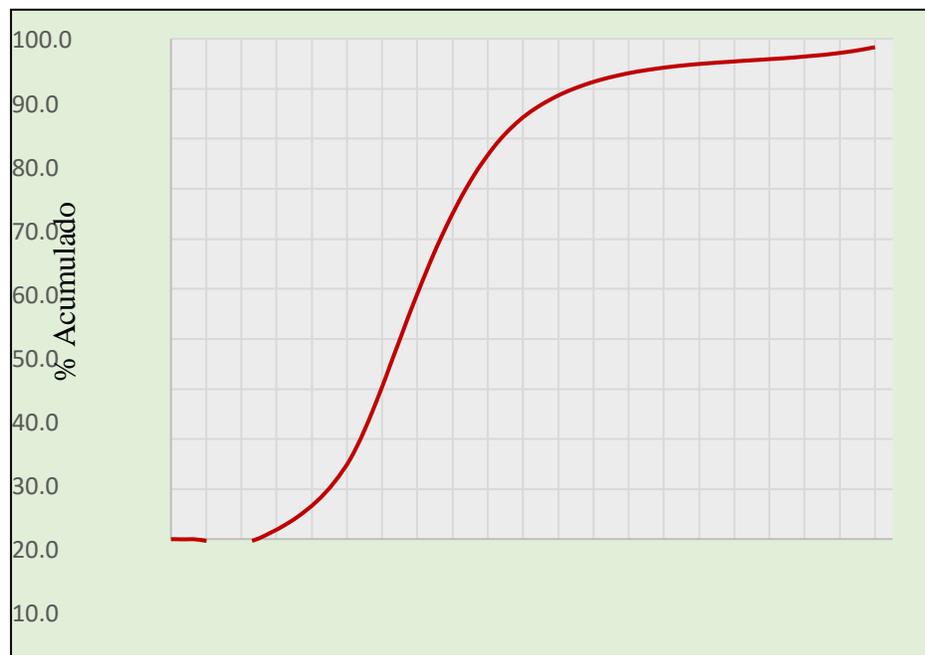
## Análisis granulométrico de la materia prima

Nº Malla (mm)	W muestra (g)	Porcentaje (%)	Acumulado (%)
2,000	3,44	1,663	98,337
1,000	28,99	14,017	84,320
0,500	143,52	69,392	14,928
0,250	30,52	14,756	0,172
0,063	0,35	0,169	0,003
0,000	0,0052	0,003	0,000
<b>Total</b>	<b>206,8252</b>	<b>100,000</b>	

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico II-1

## % Acumulado vs Nº Malla



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 2-10** Tamizado de la materia prima



**Fuente:** Elaboración propia.

#### 2.4.2.4.1 Determinación del tamaño de muestra para la extracción

Después de realizar el análisis granulométrico, el siguiente paso fue pesar las masas retenidas en los distintos tamices utilizados, las cuales se sometieron a un proceso de extracción por 3 horas, los resultados se muestran en la tabla II-12.

**Tabla II-12**

#### Porcentaje de aceite según tamaño de muestra

Nº Malla (mm)	W <sub>balón</sub> (g)	W <sub>muestra</sub> (g)	W <sub>balón final</sub> (g)	Aceite (%)
2	116,8440	5,0000	117,8115	19,3500
1	127,3566	5,0000	128,6400	25,6680
0,5	122,0404	5,0000	123,7178	33,5480
0,25	126,5110	5,0000	128,3526	36,8320

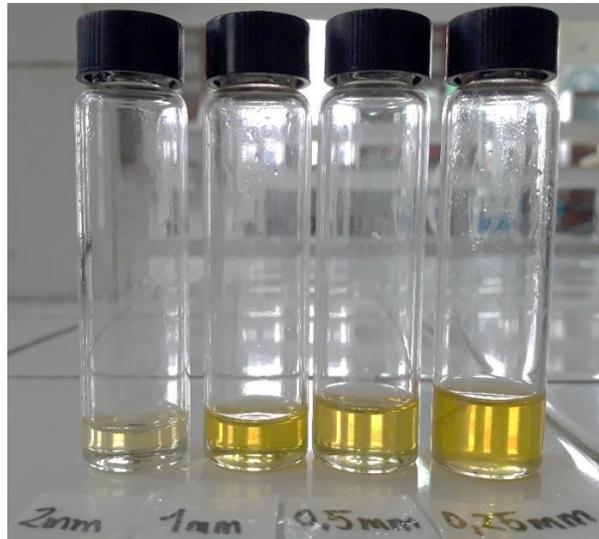
**Fuente:** Elaboración propia.

De los datos indicados en la anterior tabla, se comprueba la teoría, que a menor tamaño de partícula, mayor superficie de contacto, lo que implica mayor porcentaje de aceite extraído. Por lo tanto, los tres niveles a trabajar con el factor “tamaño de

partícula”, tal como se ha planteado en el diseño factorial, serán los tamaños de partícula retenidos en las mallas 1, 0,5 y 0,25 mm, debido a que con ellos se obtuvo mayor rendimiento de aceite extraído.

**Figura 2-11** Aceite crudo de semillas de Linaza extraído de diferentes tamaños de partícula

**Fuente:** Elaboración propia.



#### 2.4.2.5 Extracción con Solvente

La extracción del aceite de las semillas de linaza, se lleva a cabo en un extractor Soxhlet, usando Éter de petróleo como solvente y agua como refrigerante. El procedimiento empleado en esta etapa, es el descrito en la Norma Boliviana NB 313019-06 “Oleaginosas – Método para determinar el contenido de materia grasa”, cuyo principio consiste en extraer el aceite o materia grasa contenida en los granos de oleaginosas y productos derivados, libres de impurezas, utilizando éter de petróleo o hexano como solvente. Es así, que el primer requisito para la extracción es que la muestra (limpia) tenga una humedad menor al 10 %; para este caso particular no se necesitó secar la muestra debido a que las semillas de linaza utilizadas contienen una humedad de 6,12 %. El procedimiento descrito en esta norma es el siguiente:

- Pesar 5 g de muestra (previa molienda y granulometría).

- Elaborar un cartucho con papel filtro de acuerdo a lo que indica la norma y colocarlo en un segundo cartucho.
- Colocar el cartucho con la muestra al extractor, controlando que la velocidad de goteo del solvente no sea mayor de 150 gotas por minuto. Es importante mantener constante el volumen del solvente durante la extracción, agregando pequeñas porciones del mismo cuando se comprueba que parte del mismo se ha evaporado.
- Continuar la extracción el tiempo necesario para que la muestra quede agotada; al finalizar la misma, se han concentrado en el balón los volúmenes extraídos en las distintas corridas y en el cartucho de celulosa queda la materia desaceitada *harina*, que contiene fibra dietética que también puede ser aprovechada.

**Figura 2-12** Extracción de aceite de semillas de Linaza



**Fuente:** Elaboración propia.

#### 2.4.2.6 Destilación

Finalizado el proceso de extracción, inicia la etapa de destilación, que tiene lugar en el mismo extractor Soxhlet pero sin la presencia del cartucho de extracción. Esta etapa consiste en separar de la *micela* (una mezcla de aceite y solvente), el solvente, aprovechando su gran volatilidad, recuperándolo así por condensación para su posterior reutilización. El producto obtenido es aceite crudo de Linaza que aún contiene trazas de solvente que posteriormente se eliminan.

**Figura 2-13** Destilación



**Fuente:** Elaboración propia.

#### 2.4.2.7 Desolventización

Una vez finalizada la destilación, para eliminar las trazas de solvente en su totalidad, se lleva el balón a la estufa a 130 °C de temperatura por espacio de 30 min (NB 313019); con el objetivo de asegurar que el solvente se volatilice y el producto final

obtenido sea aceite crudo de semillas de Linaza. De igual manera se elimina el solvente de la harina desaceitada.

**Figura 2-14** Desolventización del aceite



**Fuente:** Elaboración propia.

#### **2.4.2.8 Almacenamiento**

El producto final obtenido (Aceite crudo de Semillas de Linaza), se almacenó en frascos de vidrio ámbar, cerrados herméticamente.

**Figura 2-15** Aceite de Semillas de Linaza

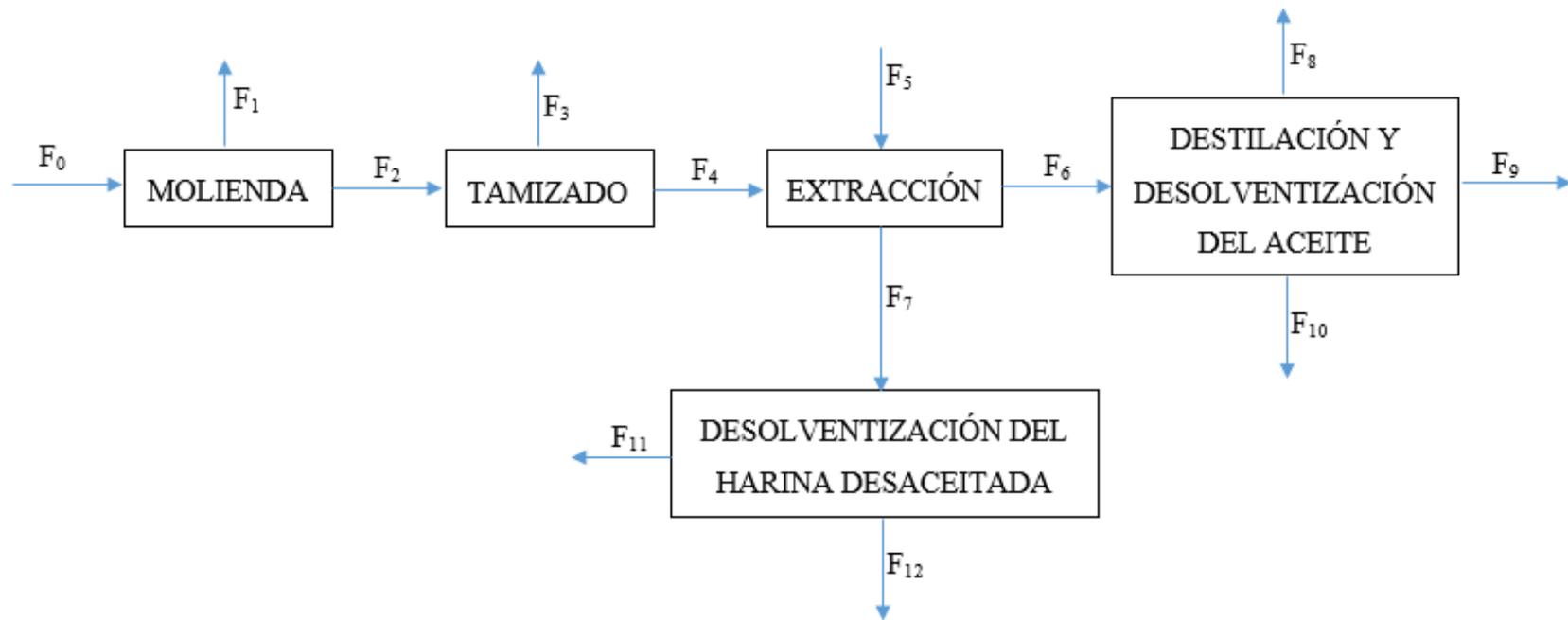


**Fuente:** Elaboración propia

#### **2.4.3 Balance de materia del proceso tecnológico experimental de obtención de aceite de semillas de Linaza**

Para facilitar la comprensión de cada etapa y su relación con las demás, en el diagrama 2-2 se presenta un diagrama de bloques del proceso tecnológico experimental de obtención de aceite crudo de semillas de Linaza mediante extracción por solvente.

**Diagrama 2-2** Diagrama de Bloques del proceso tecnológico experimental



**Fuente:** Elaboración propia.

❖ **ETAPA 1 “MOLIENDA”**

**Flujo de Entrada 0**

$$F_0 = \text{Masa de semilla} = 1 \text{ kg}$$

$$\text{Humedad} = 6,12 \%$$

**Flujo de Salida 1**

$$\text{Pérdida de semilla en la molienda} = 2,8391 \%$$

$$F_1 = \text{Pérdida de semilla en la molienda} = F_0 * 0,0284 = 1 * 0,0284 = 0,0284 \text{ kg}$$

**Flujo de Salida 2**

$$F_2 = \text{Masa de semilla molida} = F_0 - F_1 = 1 - 0,0284 = 0,9716 \text{ kg}$$

❖ **ETAPA 2 “TAMIZADO”**

**Flujo de Salida 2**

$$F_2 = \text{Masa de semilla molida} = F_0 - F_1 = 1 - 0,0284 = 0,9716 \text{ kg}$$

**Flujo de Salida 3**

$$\text{Pérdida de semilla molida} = 5,9885 \%$$

$$F_3 = \text{Pérdida de semilla molida} = F_2 * 0,0599 = 0,9716 * 0,0599 = 0,0582 \text{ kg}$$

**Flujo de Salida 4**

$$F_4 = \text{Semilla molida} = F_2 - F_3 = 0,9716 - 0,0582 = 0,9134 \text{ kg}$$

❖ **ETAPA 3-4 “EXTRACCIÓN – DESOLVENTIZACIÓN DEL HARINA”**

**Flujo de Entrada 4**

$$F_4 = \text{Semilla molida} = F_2 - F_3 = 0,9716 - 0,0582 = 0,9134 \text{ kg}$$

**Flujo de Entrada 5**

$$F_5 = \text{Solvente Éter de Petróleo} = V_{E.P.} * \rho_{E.P.} = (31\,969 \text{ ml} * 0,71 \text{ g/ml}) / 1000$$

$$F_5 = 22,6980 \text{ kg}$$

**Flujo de Salida 12**

Harina desaceitada en la semilla molida = 59,2598 %

$$F_{12} = \text{Harina desaceitada} = F_4 * 0,5961 = 0,9134 * 0,5926 = 0,5413 \text{ kg}$$

**Flujo de Salida 11**

Solvente en la harina = 3,4349 %

$$F_{11} = \text{Solvente en la harina} = F_5 * 0,0345 = 22,6980 * 0,0343 = 0,7785 \text{ kg}$$

**Flujo de Salida 7**

$$F_7 = \text{Harina} + \text{solvente} = F_{11} + F_{12} = 0,7785 + 0,5413 = 1,3198 \text{ kg}$$

**Flujo de Salida 6**

$$F_6 = \text{Micela} = F_4 + F_5 - F_7 = 0,9134 + 22,6980 - 1,3198 = 22,2916 \text{ kg}$$

❖ **ETAPA 5 “DESTILACIÓN - DESOLVENTIZACIÓN DEL ACEITE”**

**Flujo de Entrada 6**

$$F_6 = \text{Micela} = F_4 + F_5 - F_7 = 0,9134 + 22,6980 - 1,3198 = 22,2916 \text{ kg}$$

**Flujo de Salida 10**

Solvente recuperado = 82,8571 %

$$F_{10} = \text{Solvente recuperado} = F_5 * 0,8286 = 22,6980 * 0,8286 = 18,8076 \text{ kg}$$

**Flujo de Salida 8**

$$F_8 = \text{Pérdida de solvente} = F_5 - F_{11} - F_{10} = 22,6980 - 0,7785 - 18,8076 = 3,1119 \text{ kg}$$

**Flujo de Salida 9**

$$F_9 = \text{Aceite Crudo} = F_6 - F_{10} - F_8 = 22,2838 - 18,8076 - 3,1119 = 0,3721 \text{ kg}$$

$$\%R = \frac{\text{Masa Aceite Crudo}}{\text{Masa Semilla}} * 100$$

$$\%R = \frac{0,3721 \text{ kg}}{1 \text{ kg}} * 100 = 37,21 \%$$

#### 2.4.4 Balance de energía del proceso tecnológico experimental de obtención de aceite de semillas de Linaza

##### ❖ ETAPA 1 “MOLIENDA”

Las condiciones en la molienda son:

$$Tiempo = 0,02 h$$

$$Potencia = 0,8 kW$$

$$Energía = P * t$$

$$Energía = 0,8 kW * 0,02 h = 0,016 kWh$$

Para determinar el costo de la energía consumida por el molino, durante la molienda de los 230 g de semilla de linaza, se multiplica la energía por el costo por kWh.

$$Costo = 0,016 kWh * 0,90 Bs/kWh = \mathbf{0, 0144 Bs}$$

##### ❖ ETAPA 2 “TAMIZADO”

Las condiciones en el tamizado son:

$$Tiempo = 0,2 h$$

$$Potencia = 0,99 kW$$

$$Energía = P * t$$

$$Energía = 0,99 kW * 0,2 h = 0,198 kWh$$

Para determinar el costo de la energía consumida por el tamiz vibratorio, durante el tamizado de los 220 g de semilla de linaza molida, se multiplica la energía por el costo por kWh.

$$Costo = 0,198 kWh * 0,90 Bs/kWh = \mathbf{0, 1782 Bs}$$

##### ❖ ETAPA 3 “EXTRACCIÓN”

Las condiciones en el calentador eléctrico son:

$$Tiempo = 5 h$$

$$Potencia = 1,2 \text{ kW}$$

$$Energía = P * t$$

$$Energía = 1,2 \text{ kW} * 5 \text{ h} = 6 \text{ kWh}$$

Para determinar el costo de la energía consumida por el calentador eléctrico, durante la etapa de extracción de cada muestra, se multiplica la energía por el costo por kWh.

$$Costo = 6 \text{ kWh} * 0,90 \text{ Bs/kWh} = \mathbf{5,4 \text{ Bs}}$$

#### ❖ ETAPA 4 “DESTILACIÓN”

Las condiciones en el calentador eléctrico son:

$$Tiempo = 0,75 \text{ h}$$

$$Potencia = 1,2 \text{ kW}$$

$$Energía = P * t$$

$$Energía = 0,75 \text{ kW} * 1,2 \text{ h} = 0,9 \text{ kWh}$$

Para determinar el costo de la energía consumida por el calentador eléctrico, durante la recuperación del Éter de Petróleo, se multiplica la energía por el costo por kWh.

$$Costo = 0,9 \text{ kWh} * 0,90 \text{ Bs/kWh} = \mathbf{0,81 \text{ Bs}}$$

#### ❖ ETAPA 5 “DESOLVENTIZACIÓN”

Las condiciones en la estufa son:

$$Tiempo = 0,5 \text{ h}$$

$$Potencia = 2 \text{ kW}$$

$$Energía = P * t$$

$$Energía = 2 \text{ kW} * 0,5 \text{ h} = 1,00 \text{ kWh}$$

Para determinar el costo de la energía consumida por la estufa, durante la desolventización tanto del aceite obtenido como de la harina desaceitada, se multiplica la energía por el costo por kWh.

$$\text{Costo} = 1 \text{ kWh} * 0,90 \text{ Bs/kWh} = \mathbf{0,90 \text{ Bs}}$$

Por lo tanto, el costo total del proceso respecto al consumo de energía de los equipos utilizados en cada etapa del mismo, es igual a la suma de cada uno según su consumo de energía, lo que da un total de 7,3026 Bs.

#### **2.4.5 Análisis estadístico del diseño experimental**

El diseño experimental de la sección 2.3, da origen al presente análisis estadístico.

Para el análisis estadístico del diseño experimental, se utilizó el programa **SPSS 17.0** (*Statistical Package for the Social Sciences*) para Windows, el cual permite un tratamiento integrado de todas las fases que conlleva el análisis de datos, obteniéndose resultados más representativos y confiables.

Los resultados obtenidos de cada combinación tamaño de partícula-tiempo de extracción “**T-t**”, facilitaron el diseño experimental y de este modo se determinaron las variables más significativas para el proceso de extracción.

La variable respuesta de los datos experimentales, puede ser expresada a través de la masa de aceite obtenida o del rendimiento de aceite de semillas de linaza (expresado en porcentaje). Para los fines de análisis estadístico, se tomó como variable respuesta el porcentaje de aceite obtenido, por ser el parámetro que muestra claramente y en forma directa, el rendimiento del proceso y la cantidad de aceite producido.

En la tabla II-13, se muestran los resultados obtenidos de manera experimental dentro del proceso de extracción del aceite de semillas de linaza, ejecutados de acuerdo al diseño factorial que fue elaborado para el caso.

Tabla II-13

Datos experimentales del proceso de extracción de aceite de 5 g de semillas de Linaza

N° de Exp.	FACTORES		RESPUESTA I		RESPUESTA II	
	Tamaño (T)/mm	Tiempo (t)/h	Aceite (g)	Aceite (%)	Aceite (g)	Aceite (%)
1	A	c	1,2600	25,1960	1,3072	26,1429
2	A	b	1,3109	26,2143	1,2739	25,4685
3	A	a	1,3666	27,3282	1,3069	26,1338
4	B	c	1,6728	33,4199	1,6735	33,4352
5	B	b	1,7353	34,6713	1,6982	33,9362
6	B	a	1,7370	34,7303	1,7354	34,7004
7	C	c	1,8430	36,8295	1,8430	36,8335
8	C	b	1,9932	39,8234	1,8554	37,0717
9	C	a	2,0375	<b>40,7402</b>	2,0027	40,0412

**Fuente:** Elaboración propia.

El aceite de semillas de linaza se obtuvo en el proceso de extracción, empleando tres tamaños de partícula diferentes, siendo la variable A, el sólido de mayor tamaño de partícula, B el tamaño intermedio y C, el sólido de menor tamaño; combinando los tres tamaños con los distintos tiempos de extracción, a, b y c. El mayor porcentaje de aceite se obtuvo trabajando con la partícula de menor tamaño y con el mayor tiempo de extracción, siendo este rendimiento del 40,7402 %.

#### 2.4.5.1 Cálculo del Análisis de Varianza

El análisis de varianza indica las variables principales que influyen en el proceso de extracción, es decir, sobre la variable respuesta (rendimiento). Así mismo se dan las transformaciones acerca de las interacciones entre las variables que influyen en dicho rendimiento, y la significancia de los mismos. En la tabla II-14 se presentan los datos con los cuales se ha realizado el cálculo de análisis de varianza de un diseño 3 x 3.

Tabla II-14

Datos para el cálculo del análisis de varianza

Tamaño	Tiempo	T-t	Rendimiento
1	1	1	25,1960
1	0	0	26,2143
1	-1	-1	27,3282
0	1	0	33,4199
0	0	0	34,6713
0	-1	0	34,7303
-1	1	-1	36,8295
-1	0	0	39,8234
-1	-1	1	40,7402
1	1	1	26,1429
1	0	0	25,4685
1	-1	-1	26,1338
0	1	0	33,4352
0	0	0	33,9362
0	-1	0	34,7004
-1	1	-1	36,8335
-1	0	0	37,0717
-1	-1	1	40,0412

Fuente: SPSS 17.0

Tabla II-15 Factores Inter-sujetos

		N
Tamaño	-1,00	6
	0,00	6
	1,00	6
Tiempo	-1,00	6
	0,00	6
	1,00	6

Fuente: SPSS 17.0

La tabla II-15 indica el número de ensayos realizados, siendo 6 ensayos con cada tamaño fijado y 6 ensayos con cada tiempo fijado.

Tabla II-16

## Pruebas de los efectos inter-sujetos

Origen	Suma de cuadrados tipo III	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	496,034 <sup>a</sup>	8	62,004	97,207	0,000
Intersección	19 516,979	1	19 516,979	30 597, 578	0,000
Tamaño	480,280	2	240,140	376,478	0,000
Tiempo	11,686	2	5,843	9,160	0,007
Tamaño*Tiempo	4,068	4	1,017	1,594	0,257
Error	5,741	9	0,638		
Total	20 018,753	18			
Total corregida	501,776	17			

a. R cuadrado = 0,989 (R cuadrado corregido = 0,978)

**Fuente:** SPSS 17.0

En la tabla II-16 se muestran los resultados del análisis de varianza, aplicado a los datos experimentales del proceso de extracción de aceite de semillas de linaza.

Se puede observar con excepción de la variable interacción tamaño de partícula- tiempo de extracción, que el efecto de las variables tamaño de partícula y tiempo de extracción, influyen sobre el porcentaje de aceite crudo extraído, esto se debe a que el nivel de significancia es menor al 5 % o 0,05, lo que implica la posibilidad de que las variables sean significativas sobre el proceso de extracción de aceite de semillas de linaza, con una confianza del 95 %.

Tabla II-17

## Variables introducidas/eliminadas

Modelo	Variables Introducidas	Variables Eliminadas	Método
1	Tiempo, Tamaño <sup>a</sup>	-	Introducir

a. Todas las variables solicitadas introducidas.

**Fuente:** SPSS 17.0

En la tabla II-17 se muestra las variables introducidas y eliminadas a través del programa, la variable eliminada es la interacción tamaño de partícula-tiempo de extracción por no ser significativa.

**Tabla II-18**

**Ajustes de datos para el modelo lineal general**

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregido	Error típico de la estimación
1	0,977 <sup>a</sup>	0,954	0,947	1,2450569

a. Variables predictoras: (Constante), Tiempo, Rendimiento

b. Variable dependiente: Rendimiento

**Tabla II-19 ANOVA (b)**

Modelo	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1 Regresión	478,522	2	239,261	154,345	0,000 <sup>a</sup>
Residual	23,252	15	1,550		
Total	501,775	17			

a. Variables predictoras: (Constante), Tiempo, Tamaño b. Variables dependiente: Rendimiento

**Fuente:** SPSS 17.0

**Tabla II-20 Coeficientes (a)**

Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados	t	Sig.	Intervalo de confianza para B	
	B	Error tip.	Beta			Límite inferior	Límite superior
(Constante)	32,928	0,293		112,206	0,000	32,303	33,554
Tamaño	-6,237	-0,359	-0,965	-17,354	0,000	-7,004	-5,471
Tiempo	-0,985	-0,359	-0,152	-2,741	0,015	-1,751	-0,219

a. Variable dependiente: Rendimiento

**Fuente:** SPSS 17.0

De la tabla II-20 se determinó que el modelo matemático ajustado para el proceso de extracción, que correlaciona el porcentaje de aceite extraído con las variables, tiempo y tamaño de las partículas, para el caso estudiado es el siguiente:

$$\text{Rendimiento} = 32,928 - 6,237 \text{ Tamaño} - 0,985 \text{ Tiempo}$$

Por lo tanto, el rendimiento está en función al tamaño de la partícula y el tiempo de extracción, siendo estos de signo negativo, es decir que mientras más pequeño sea el tamaño de partícula y el tiempo de extracción mayor, se ve favorecido el rendimiento del aceite.

Acontinuación en la tabla II-21, se comparan los resultados del rendimiento respecto al porcentaje de aceite obtenido de manera experimental y el obtenido a través del modelo matemático, donde se observa que no existe una varianza mayor al 5 %.

**Tabla II-21**

**Resultados del rendimiento experimental y obtenido con el modelo matemático**

Tamaño	Tiempo	Rendimiento experimental	Rendimiento modelo matemático	CV
1	1	25,1960	25,7060	1,4169
1	0	26,2143	26,6910	1,2743
1	-1	27,3282	27,6760	0,8942
0	1	33,4199	31,9430	3,1955
0	0	34,6713	32,9280	3,6471
0	-1	34,7303	33,9130	1,6838
-1	1	36,8295	38,1800	2,5462
-1	0	39,8234	39,1650	1,1788
-1	-1	40,7402	40,1500	1,0319
1	1	26,1429	25,7060	1,1917
1	0	25,4685	26,6910	3,3146
1	-1	26,1338	27,6760	4,0532
0	1	33,4352	31,9430	3,2278
0	0	33,9362	32,9280	2,1324
0	-1	34,7004	33,9130	1,6229
-1	1	36,8335	38,1800	2,5385
-1	0	37,0717	39,1650	3,8831
-1	-1	40,0412	40,1500	0,1919

**Fuente:** Elaboración propia.

Tabla II-22 Estadísticos sobre los residuos (a)

	Mínimo	Máximo	Media	Desviación típica	N
Valor pronosticado	25,705614	40,151096	32,928356	5,3055029	18
Valor pronosticado tip.	-1,361	1,361	0,000	1,000	18
Error típico de valor pronosticado	0,293	0,587	0,500	0,096	18
Valor pronosticado corregido	25,580675	40,182495	32,972962	5,3106982	18
Residual	-2,0941305	1,7429445	0,0000000	1,1695273	18
Residuo tip.	-1,682	1,400	0,000	0,939	18
Residuo estud.	-1,813	1,440	-0,016	1,021	18
Residuo eliminado	-2,4348636	1,8454705	-0,0446060	1,3831186	18
Residuo eliminado estud.	-1,981	1,499	-0,027	1,052	18
Dist. De Mahalanobis	0,000	2,833	1,889	0,972	18
Distancia de Cook	0,001	0,188	0,061	0,062	18
Valor de influencia centrado	0,000	0,167	0,111	0,057	18

a. Variable dependiente: Rendimiento

**Fuente:** SPSS 17.0

Del análisis estadístico se puede concluir lo siguiente:

- La elección del modelo es correcta, por cuanto la variable dependiente y las variables independientes son significativas para un nivel de confianza de 95 %.
- El factor que más influye en el proceso de extracción, es el tamaño de partícula con una elevada significancia, siguiéndole en importancia el tiempo de extracción que está ligado al tamaño de la partícula, por cuanto a menor tamaño se tiene mayor area de contacto y esto implica un menor tiempo de extracción. Por lo tanto, se debe tener especial atención en el manejo de estas variables, en el proceso productivo industrial.

## 2.5 DETERMINACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE DIFUSIÓN EN LA EXTRACCIÓN DE ACEITE DE SEMILLAS DE LINAZA

Como se mostró anteriormente en el capítulo I (sección 1.5.5.2.2.1), la ecuación que más se acerca a la velocidad real de difusión de la sustancia grasa de las semillas al solvente es la siguiente:

$$\log \frac{q_{\theta}}{q_0} = a - 4,286 \frac{D}{(2l)^2} \theta$$

Donde:

$q_{\theta}$  = Cantidad de aceite por unidad de peso después de la extracción,

$q_0$  = Cantidad de aceite por unidad de peso antes de la extracción.

$D$  = Constante de difusión a una temperatura dada.

$2l$  = Espesor de las láminas.

$\theta$  = Tiempo de extracción.

### 2.5.1 Determinación del coeficiente de difusión para partículas de (1 mm)

A continuación se puede observar la tabla II-23 que contiene los datos experimentales de la extracción en función del tiempo para partículas de (1 mm).

**Tabla II-23**

**Datos experimentales obtenidos para la determinación del coeficiente de difusión para partículas de (1 mm)**

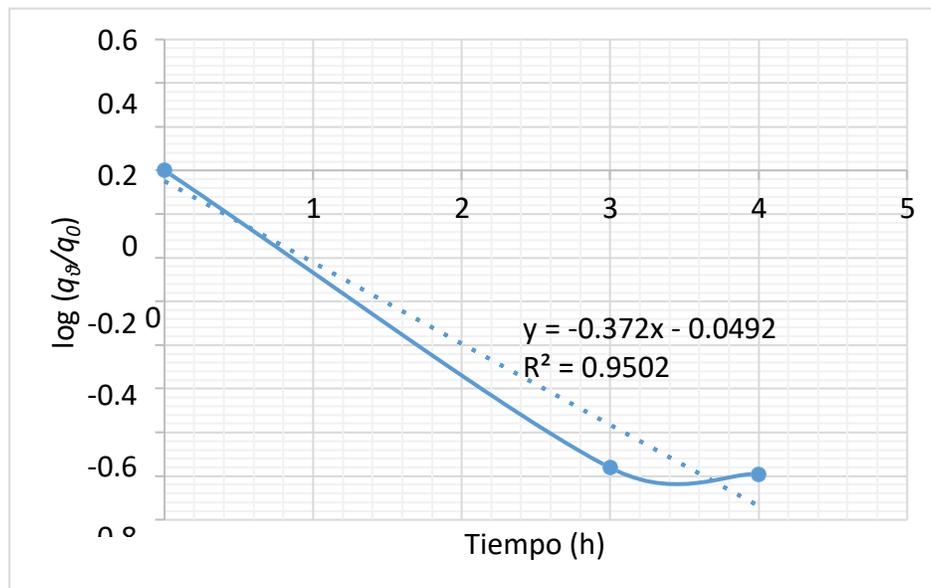
Tiempo (h)	Aceite extraído (g/g s.s.)	% de aceite extraído	Fracción de aceite retenido ( $q_{\theta}/q_0$ )	$\log (q_{\theta}/q_0)$
0	0	0	1	0
3	1,3072	95,6534	0,0435	-1,3619
4	1,3109	95,9242	0,0408	-1,3898
5	1,3666	100	0	

**Fuente:** Elaboración propia.

A partir de estos datos experimentales se construyó el gráfico II-2, donde se determinó la función de la curva.

**Gráfico II-2**

**Tiempo vs  $\log (q_{\theta}/q_0)$  para partículas de (1 mm)**



**Fuente:** Elaboración propia.

La función de esta gráfica es la siguiente:

$$y = -0,372x - 0,0492$$

Donde:

$$\log \left( \frac{q_{\theta}}{q_0} \right) = -a \quad 4,286 \frac{D}{(2l)^2} = b$$

Reemplazando datos y despejando, se obtiene el siguiente coeficiente de difusión para partículas de 1 mm.

$$q_{\theta} \log \left( \frac{q_{\theta}}{q_0} \right) = -0,0492 - 4,286 \frac{D}{(2l)^2} \theta$$

$$D \frac{4,286}{(2l)^2} = 0,372, \quad D = 3,4718 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

### 2.5.2 Determinación del coeficiente de difusión para partículas de (0,5 mm)

A continuación se puede observar la tabla II-24 que contiene los datos experimentales de la extracción en función del tiempo para partículas de (0,5 mm).

**Tabla II-24**

**Datos experimentales obtenidos para la determinación del coeficiente de difusión para partículas de (0,5 mm)**

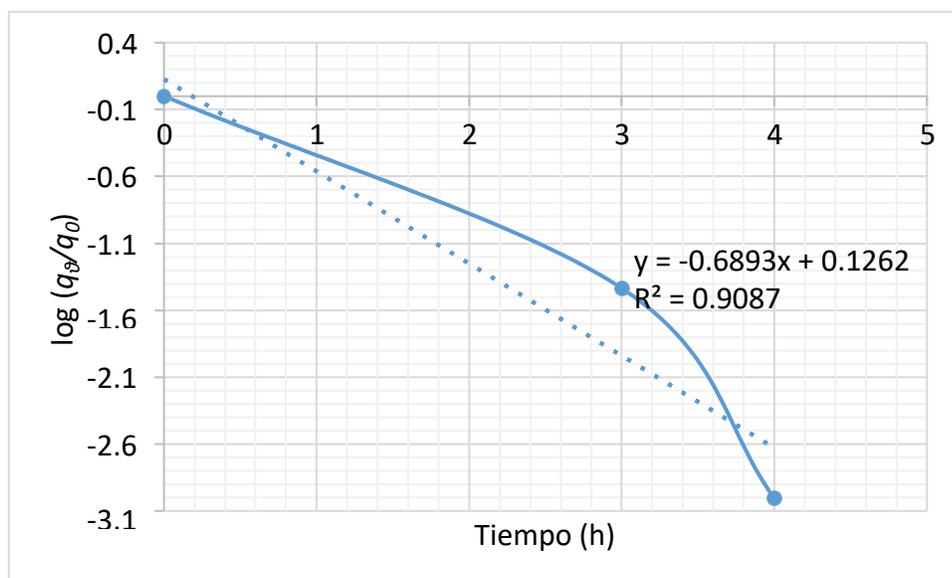
Tiempo (h)	Aceite extraído (g/g s.s.)	% de aceite extraído	Fracción de aceite retenido ( $q_\theta/q_0$ )	$\log (q_\theta/q_0)$
0	0	0	1	0
3	1,6735	96,3443	0,0366	-1,4370
4	1,7353	99,9021	0,0010	-3,0094
5	1,7370	100	0	

**Fuente:** Elaboración propia.

A partir de estos datos experimentales se construyó el gráfico II-3, donde se determinó la función de la curva.

**Gráfico II-3**

**Tiempo vs  $\log (q_\theta/q_0)$  para partículas de (0,5 mm)**



**Fuente:** Elaboración propia.

La función de esta gráfica es la siguiente:

$$y = -0,6893x + 0,1262$$

Donde:

$$\log \left( \frac{q_{\theta}}{q_0} \right) = -a \qquad 4,286 \frac{D}{(2l)^2} = b$$

Reemplazando datos y despejando, se obtiene el siguiente coeficiente de difusión para partículas de 0,5 mm.

$$q_{\theta} \log \left( \frac{q_{\theta}}{q_0} \right) = 0,1262 - 4,286 \frac{D}{(2l)^2} \theta$$

$$4,286 \frac{D}{(2l)^2} = 0,6893$$

$$D = 1,6083 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

### 2.5.3 Determinación del coeficiente de difusión para partículas de (0,25 mm)

A continuación se puede observar la tabla II-25 que contiene los datos experimentales de la extracción en función del tiempo para partículas de (0,25 mm).

**Tabla II-25**

**Datos experimentales obtenidos para la determinación del coeficiente de difusión para partículas de (0,25 mm)**

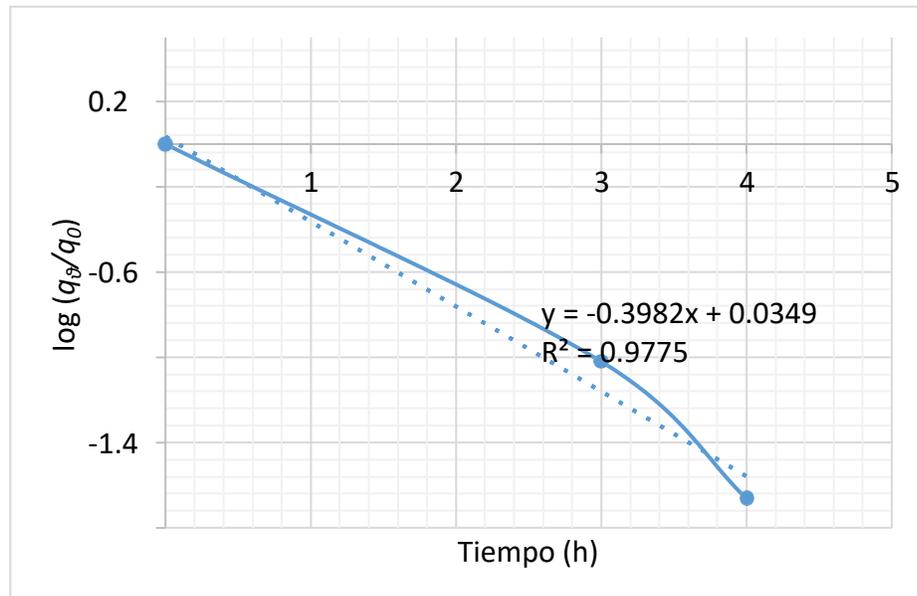
Tiempo (h)	Aceite extraído (g/g s.s.)	% de aceite extraído	Fracción de aceite retenido ( $q_{\theta}/q_0$ )	$\log (q_{\theta}/q_0)$
0	0	0	1	0
3	1,8430	90,4540	0,0955	-1,0202
4	1,9932	97,8258	0,0217	-1,6627
5	2,0375	100	0	

**Fuente:** Elaboración propia.

A partir de estos datos experimentales se construyó el gráfico II-4, donde se determinó la función de la curva.

Gráfico II-4

Tiempo vs  $\log (q_{\theta}/q_0)$  para partículas de (0,25 mm)



**Fuente:** Elaboración propia.

La función de esta gráfica es la siguiente:

$$y = -0,3982x + 0,0349$$

Donde:

$$\log \left( \frac{q_{\theta}}{q_0} \right) = -a \quad 4,286 \frac{D}{(2l)^2} = b$$

Reemplazando datos y despejando, se obtiene el siguiente coeficiente de difusión para partículas de 0,25 mm.

$$q_{\theta} \log \left( \frac{q_{\theta}}{q_0} \right) = 0,0349 - 4,286 \frac{D}{(2l)^2} \theta$$

$$4,286 \frac{D}{(2l)^2} = 0,3982$$

$$D = 2,3227 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$$

## 2.6 ANÁLISIS DEL PRODUCTO OBTENIDO

Los análisis fisicoquímicos para el producto final se realizaron en los laboratorios del Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo “CEANID”, dependiente de la Universidad Autónoma “Juan Misael Saracho” y en el Centro de Alimentos y Productos Naturales “CAPN”, dependiente de la Universidad Mayor de “San Simón” de la ciudad de Cochabamba.

Los análisis realizados al aceite crudo de semilla de Linaza procedente de la comunidad tarijeña Yesera Sud, en el laboratorio del CEANID fueron los siguientes:

- Determinación porcentual de humedad.
- Determinación porcentual de acidez titulable.
- Determinación del índice de peróxidos.
- Determinación del índice de refracción.
- Determinación de la densidad relativa.

Los análisis realizados al aceite crudo de semilla de Linaza procedente de la comunidad tarijeña Yesera Sud, en el laboratorio del CAPN fueron los siguientes:

- Determinación porcentual de ácidos saturados e insaturados.

### 2.6.1 Resultados de los análisis del producto final

Las características fisicoquímicas del aceite de semillas de Linaza obtenido, son las siguientes:

**Tabla II-26**

#### Características Fisicoquímicas del Aceite Crudo de semillas de Linaza

Parámetro	Unidad	Resultado
Acidez (como ácido oleico)	%	0,305
Densidad relativa (20 °C)	-	0,9295
Humedad	%	0,5
Índice de peróxido	MeqO <sub>2</sub> /kg	7,79
Índice de refracción (20 °C)	-	1,4806

**Fuente:** Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo “CEANID”, 2018.

Los resultados presentados en la tabla II-26, serán comparados más adelante con los que se tiene como referencia bibliográfica.

## 2.7 CONTROL DE CALIDAD DEL PRODUCTO OBTENIDO

En la siguiente tabla II-27 se presentan los resultados del análisis de perfil de ácidos grasos realizado al aceite de semillas de Linaza obtenido, mismos que serán comparados en el siguiente capítulo con los que se tiene como referencia bibliográfica.

**Tabla II-27**

### Perfil de ácidos grasos saturados e insaturados del Aceite crudo de Linaza

Perfil de Ácidos Grasos		Unidad	Resultado
Ácido Palmítico	C16:0	%	6,19
Ácido Esteárico	C18:0	%	2,49
<b>Ácido Oleico</b>	<b>C18:1n9c</b>	%	<b>14,00</b>
<b>Ácido Linoleico</b>	<b>C18:2n6c</b>	%	<b>12,03</b>
<b>Ácido Linolénico</b>	<b>C18:3n3</b>	%	<b>65,29</b>
Ácidos Saturados totales		%	8,69
Ácidos Insaturados totales		%	91,31

**Fuente:** Centro de Alimentos y Productos Naturales “CAPN”, 2018.

## CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 COMPARACIÓN DE LA SEMILLA DE LINAZA

Las características de la materia prima utilizada en el presente proyecto de investigación comparada con la que se encuentra como referencia en bibliografía, se detalla a continuación en la tabla III-1

**Tabla III-1 Comparación de la Materia Prima**

<b>Semillas de Linaza <i>Linum usitatissimum</i>, L.</b>		
<b>Parámetros (%p/p)</b>	<b>(Datos bibliográficos)</b>	<b>(Yesera Sud-Tarija)</b>
Humedad	7,2	6,12
Proteína	19,9	18,86
Materia grasa	37,4	34,84
Cenizas	3,1	2,81
Hidratos de carbono	7,2	11,31
Fibra dietética	25,2	26,00

**Fuente:** Jiménez P., et al, 2013. Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo “CEANID”, 2018.

En la tabla III-1 se observa que el contenido de agua es menor que el que señala la bibliografía, con menor contenido de aceite (pero dentro del rango antes mencionado) y mayor porcentaje de fibra.

### 3.2 COMPARACIÓN DEL ACEITE CRUDO DE SEMILLA DE LINAZA

Las características fisicoquímicas y el perfil de ácidos grasos del aceite crudo de semillas de Linaza obtenido en la parte experimental del presente proyecto de investigación y las que se encuentran como referencia en bibliografía; se detallan a continuación en las tabla III-2 y la tabla III-3, respectivamente.

Tabla III-2

## Comparación del Aceite Crudo de Semillas de Linaza

<b>Aceite Crudo de Semillas de Linaza <i>Linum usitatissimum</i>, L.</b>		
<b>Parámetro</b>	<b>(Datos bibliográficos)</b>	<b>(Experimental)</b>
Acidez (como ácido oleico) (%)	0,304	0,305
Densidad relativa (20 °C)	0,9250-0,9350	0,9295
Humedad (%)	Max. 0,5	0,5
Índice de peróxido (MeqO <sub>2</sub> /kg)	Max. 10	7,79
Índice de refracción (40 °C)	1,4720-1,4750	1,4730*

\* Índice de refracción ajustado a la temperatura de 40 °C.

**Fuente:** Arilmi Gorriti, et. al., 2010. Comisión del CODEX Alimentarius, 2016. Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo “CEANID”, 2018

De los parámetros comparados, se puede observar que las características del aceite de semillas de Linaza obtenido mediante extracción por solvente (Éter de Petróleo), en cuanto a densidad, índice de peróxidos e índice de refracción, están dentro del rango que especifica la Norma STAN 210-1999 del CODEX Alimentarios, para aceite crudo de Linaza. Así también, el porcentaje de humedad y la acidez (expresada como % ácido oleico), cumplen con las especificaciones que debe tener un aceite crudo de Linaza, según referencias bibliográficas.

Tabla III-3

## Comparación Perfil de ácidos grasos del Aceite crudo de Linaza

<b>Aceite Crudo de Semillas de Linaza <i>Linum usitatissimum</i>, L.</b>		
<b>Perfil de Ácidos Grasos</b>	<b>(Datos bibliográficos) (%)</b>	<b>(Experimental) (%)</b>
Ácido Palmítico C16:0	4-13	6,19
Ácido Esteárico C18:0	2-5	2,49
<b>Ácido Oleico C18:1n9c</b>	<b>10-34</b>	<b>14,00</b>
<b>Ácido Linoleico C18:2n6c</b>	<b>12-18</b>	<b>12,03</b>
<b>Ácido Linolénico C18:3n3</b>	<b>35-71</b>	<b>65,29</b>

**Fuente:** Comisión del CODEX Alimentarius, 2016. Centro de Alimentos y Productos Naturales “CAPN”, 2018.

De los resultados comparados, se puede observar que el porcentaje de ácidos grasos del aceite de semillas de Linaza obtenido mediante extracción por solvente (Éter de Petróleo), están dentro del rango que especifica la Norma STAN 210-1999 del CODEX Alimentarios, para aceite crudo de Linaza. Así también, se observa que el ácido graso que se encuentra en mayor proporción es el ácido linolénico (65,29 %), seguido por el ácido linoleico (12,03 %) y este por el ácido oleico (14,00 %).

### 3.3 COEFICIENTES DE DIFUSIÓN EN LA EXTRACCIÓN DE ACEITE DE SEMILLAS DE LINAZA

En la tabla III-4, se presentan los valores de los coeficientes de difusión obtenidos para los tamaños de partículas empleados en la extracción de aceite de semillas de Linaza.

**Tabla III-4**

#### **Resultados de los Coeficientes de Difusión en la extracción**

<b>Tamaño de Partícula (mm)</b>	<b>Coefficiente de difusión (m<sup>2</sup>/s)</b>
1,00	3,4718x10 <sup>-7</sup>
0,50	1,6083x10 <sup>-7</sup>
0,25	2,3227x10 <sup>-8</sup>

**Fuente:** Elaboración propia.

Como se menciona en párrafos anteriores, el coeficiente de difusión es un valor que representa la facilidad con que el soluto se mueve en el disolvente y depende de factores como la temperatura, la viscosidad del solvente, el tamaño y la forma del soluto. En los datos mostrados en la tabla III-4 se puede observar como disminuye el coeficiente de difusión a medida que disminuye el tamaño de partícula.

### 3.4 INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS SOBRE EL RENDIMIENTO

Tabla III-5

Datos experimentales del proceso de extracción de aceite de 5 g de semillas de Linaza

Nº de Exp.	FACTORES		RESPUESTA I		RESPUESTA II	
	Tamaño (T)/mm	Tiempo (t)/h	Aceite (g)	Aceite (%)	Aceite (g)	Aceite (%)
1	A	c	1,2600	25,1960	1,3072	26,1429
2	A	b	1,3109	26,2143	1,2739	25,4685
3	A	a	1,3666	27,3282	1,3069	26,1338
4	B	c	1,6728	33,4199	1,6735	33,4352
5	B	b	1,7353	34,6713	1,6982	33,9362
6	B	a	1,7370	34,7303	1,7354	34,7004
7	C	c	1,8430	36,8295	1,8430	36,8335
8	C	b	1,9932	39,8234	1,8554	37,0717
9	C	a	2,0375	40,7402	2,0027	40,0412

**Fuente:** Elaboración propia.

La tabla III-5 vista en la sección 2.4.3, muestra los resultados experimentales obtenidos en el proceso de extracción del aceite de semillas de Linaza, donde se evidencia la influencia de los parámetros, tamaño de partícula y tiempo de extracción sobre el rendimiento del aceite.

Los datos indicados, muestran claramente que pese a que obtiene un rendimiento de aceite crudo del 40,7402 % en 5 h de extracción, el tamaño de la partícula es determinante.

#### 3.4.1 Condiciones de operación recomendadas para el proceso de extracción

De los datos experimentales en la tabla III-6 se construyó el gráfico III-1, empleando los datos obtenidos en la extracción con el menor tamaño de partícula (C), y con el cual se obtuvo los mejores rendimientos de aceite.

Tabla III-6

Datos experimentales del proceso de extracción de aceite de 5 g de semillas de Linaza empleando el tamaño de partícula C

N° de Exp.	Tamaño (T)/mm	Tiempo (t)/h	Aceite (%)
7	0,25	3	36,8315
8	0,25	4	38,4475
9	0,25	5	40,3907
10	0,25	6	40,8963
11	0,25	7	41,2140

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico III-1

Rendimiento de aceite de semillas de Linaza empleando el tamaño de partícula C



Fuente: Elaboración propia.

Antes de seleccionar las condiciones de operación óptimas para el proceso, se realizaron dos experimentos más, donde se lleva a cabo extracciones durante 6 y 7 horas; con el fin de conocer si el aumento en el rendimiento es considerable. Siendo los resultados 40,8963 % y 41,2140 % respectivamente. Es así, que observando los

porcentajes más altos de aceite de semilla de linaza obtenidos, hasta las 5 horas de extracción, el aumento es significativo (de 4 a 5 horas el porcentaje de aceite se incrementa en un 4,39 %). En cambio, para las siguientes dos extracciones, el incremento en el rendimiento es bajo, 1,25 % y 0,78 % respectivamente.

Por lo tanto, tomando en cuenta además los costos en energía y solvente que implican las extracciones por mayor tiempo, se escoge como condición óptima un tiempo de extracción de 5 horas, un tamaño de partícula de 0,25 mm de luz de malla, una temperatura de extracción de 35 °C, temperatura de ebullición del Éter de Petróleo; y una relación sólido-liquido de 0,0286 g/ml (5/175).

**Tabla III-7**

**Condiciones de operación recomendadas para el proceso de extracción de Aceite de semillas de Linaza**

Tamaño de Partícula (C)		Tiempo de extracción (h)	Temperatura de extracción (°C)	Relación Sólido/Líquido (g/ml)
Serie Tyler	Abertura de malla (mm)	5	35	5/175
60	0,25			

**Fuente:** Elaboración propia.

## CAPÍTULO IV CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 CONCLUSIONES

Respondiendo a los objetivos planteados en el presente proyecto de investigación, basados en los resultados, las conclusiones son las siguientes:

- Los parámetros más importantes en la caracterización de la semilla de Linaza, son su bajo porcentaje de humedad 6,12 % (no necesita una etapa de secado durante el pretratamiento) y su elevado contenido de materia grasa 34,84 %.
- Referente a la extracción del aceite de semilla de Linaza, resulta más adecuado trabajar con la fracción más fina que por contener más aceite y favorecer la velocidad de extracción, brinda mejores rendimientos en el proceso y en un tiempo que permite la mayor obtención del producto de interés, considerando además los factores de energía consumida y cantidad de solvente utilizado (los cuales inciden directamente en los costos del proceso).

Las condiciones de operación recomendadas para el proceso de obtención de aceite de semilla de linaza mediante extracción por solvente, son:

Tamaño de partícula	0,25 mm de malla
Tiempo de extracción	5 horas
Temperatura de extracción	35 °C
Relación solido/líquido	0,0286 g/ml

- Los resultados del diseño factorial utilizando el programa estadístico SPSS 17.0 indican que las variables, tiempo de extracción y tamaño de partícula, influyen significativamente sobre el porcentaje obtenido de aceite de semilla de Linaza. Lo cual no sucede con la variable interacción tamaño de partícula-tiempo de extracción.
- La determinación de las propiedades fisicoquímicas del producto, aceite de semilla de Linaza, proporciona la siguiente información:

Acidez (como ácido oleico)	0,305 %
Densidad relativa	0,9295

Humedad	0,5 %
Índice de Peróxido	7,79 MeqO <sub>2</sub> /kg
Índice de refracción	1,4806

Estos parámetros se asemejan lo suficiente a los que debe presentar un aceite crudo de Linaza según la Norma CODEX STAN 210-1999; lo que permite decir que se ha obtenido un aceite que cumple con las características fisicoquímicas establecidas en la mencionada norma.

- La determinación del perfil de ácidos grasos del producto, aceite de semillas de Linaza indica la siguiente proporción:

Ácido Linolénico	65,29 %
Ácido Linoleico	12,03 %
Ácido Oleico	14,00 %
Acido Palmítico	6,19 %
Ácido Esteárico	2,49 %

Estos porcentajes cumplen con los valores que debe presentar un aceite crudo de Linaza según la Norma CODEX STAN 210-1999; lo que permite decir que se ha obtenido un aceite que cumple con las propiedades respecto al contenido de ácidos grasos esenciales.

- El rendimiento del proceso experimental es del 37,21 % de aceite de semilla de Linaza como resultado del balance de masa realizado, un valor bastante aceptable, que indica las buenas condiciones con las que se trabajó a escala laboratorio.

En conclusión, el presente proyecto de investigación, colabora en la incorporación de un producto en el mercado nacional, con mayor valor económico que incentiva en el fortalecimiento de la producción nacional agrícola de Linaza, cuyas propiedades lo hacen un producto sustentable y le confieren un gran potencial con amplia gama de aplicaciones; como una nueva alternativa alimenticia con la obtención de un producto de alto valor nutritivo; en la industria química, como materia prima para la producción de óleos, barnices, recubrimientos de superficies a base de aceites y linóleo. También se utiliza para modificar las resinas alquídicas y en la preparación de jabones, masillas, tintas de imprenta y ungüentos, así como también en cosmética.

## 4.2 RECOMENDACIONES

- Analizar la factibilidad técnica y económica, que implicaría introducir una etapa de pre-prensado antes de la extracción por solvente, por tratarse de una oleaginosa con elevado contenido de materia grasa.
- Los resultados obtenidos en base al rendimiento, incentivan a recomendar un estudio más detallado del proceso de extracción, para evaluar parámetros como la relación sólido-líquido, temperatura y tiempo de extracción, en las condiciones que se trabaja en la industria.

Como se trabajó a nivel de laboratorio, el método utilizado muestra resultados satisfactorios; pero puede presentar algunos inconvenientes al llevarse a escala industrial, por lo que se recomienda escalar el proceso a nivel de planta piloto.