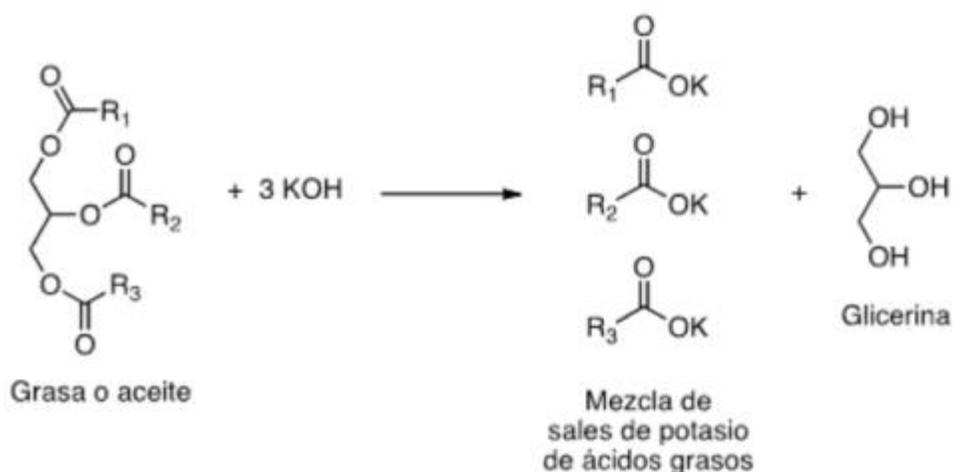


CAPÍTULO I
MARCO TEÓRICO

1.1 Definición del jabón

El **jabón** proviene del latín tardío *sapo*, y este del germánico *saipôn*, es el resultado de un proceso de reacción que recibe el nombre de saponificación; consiste en el tratamiento que se realiza en un aceite vegetal o una grasa animal con una disolución de soda denominada hidróxido de sodio o hidróxido de potasio, produciendo glicerina y sal sódica del ácido graso llamada jabón.

La figura 1-1 se muestra la reacción química de saponificación para la producción de jabón.



Fuente: Ignacio R., “Revisión bibliográfica sobre jabones”, 2014

Figura 1- 1 Reacción de saponificación

Arévalo V. y Sisalima C. (2018) sostuvieron que actualmente el jabón líquido es un producto cosmético usado en la higiene de manos y cuerpo de todos los grupos poblacionales y son preparados con agentes tensoactivos, humectantes, viscosos o espesantes, etc. Componentes que no generan resequedad en la piel, la espuma es menor y es más fácil evitar que existan residuos en la piel manteniendo un mejor equilibrio de su pH. Las propiedades del jabón líquido son la facilidad de aplicación por ser viscoso para permanecer en las manos al aplicarse; humectante para mantener la piel saludable y protegida de agresiones externas, enfermedades y envejecimiento.

1.2 Materia prima

En la fabricación del jabón, los caracteres físicos y químicos del producto dependen directamente de las materias primas empleadas. La materia prima utilizada en este caso es el aceite extraído de la borra de café.

1.2.1 Cafetos (coffea)

El nombre español de la planta: café procede del italiano caffè. Los cafetos son arbustos de las regiones tropicales del género Coffea, de la familia de los rubiáceos.

El Café consiste en un grano, fruto de un arbusto llamado Cafeto, del cual proviene su nombre. El café es uno de los productos naturales de mayor complejidad, por su historia, su comercio y su riqueza química, conformado por ácidos orgánicos, aldehídos, cetonas, esteroides, hidrocarburos de bajo peso molecular, aminoácidos, cafeína, carbohidratos, proteínas, trigonelina, lípidos, glucósidos y minerales; los cuales al momento de que el café es procesado, y posteriormente mediante una infusión, contribuyen con el sabor y aroma característico, convirtiéndolo en una de las bebidas más consumidas en el mundo.

Los granos de café en realidad son las semillas que están dentro de los frutos comestibles del cafeto. Luego los granos verdes se tuestan en distintos grados para lograr el sabor deseado, antes de molerlos y preparar el café.

Comúnmente se cultivan en las regiones tropicales y ecuatoriales, donde siempre es primavera o verano. La época de floración es al comienzo de la temporada de lluvias; sus flores son blancas y perfumadas. Después de ocho o nueve meses aparecen los frutos, que son bayas rojas, brillantes y carnosas que asemejan a las cerezas.

Los frutos son carnosos, rojos o púrpuras cuando están maduros, rara vez amarillos. Son bayas que se conocen como cerezas de café; en el interior tienen dos núcleos, cada uno de ellos con un grano de café, la semilla de la planta. Las semillas están envueltas por una membrana semirrígida transparente, llamada pergamino, que es la pared del núcleo, y un mesocarpio rico en mucílago, que es una capa de pulpa azucarada. Una vez retirado, el grano de café verde se observa rodeado de una piel plateada adherida, que se corresponde con el tegumento de la semilla.

Se cultivan extensamente por sus semillas que se emplean, molidas y tostadas, para la elaboración del café.

1.2.2 Variedad de granos de café

De las más de cien especies que pertenecen al género *Coffea*, se usan principalmente solo dos para la preparación de la bebida: *Coffea* arábica y *Coffea canephora*. La primera especie abarca casi tres cuartas partes de la producción mundial y se cultiva principalmente en zonas tropicales.

1.2.2.1 *Coffea* arábica

Coffea arábica también llamado cafeto arábica o arábico o simplemente café arábigo es la más cultivada desde la Antigüedad. Representa el 75 % de la producción mundial de café. Los granos de café arábica tienen una forma aplastada y alargada, son ovalados con una raya divisoria curva, de ligera forma de “S”. Esta variedad posee cualidades que generan una bebida aromática y afrutada, aportando un mejor sabor, mayor calidad y contiene la mitad de cafeína que el café robusto. El cultivo del cafeto arábica es más delicado, menos productivo y está reservado a tierras altas de montaña, entre 600 y 2000 msnm. Los diez países con mayor producción de café arábigo, según las estadísticas del 2018/2019, son: Brasil, Colombia, Etiopía, Honduras, Perú, Guatemala, México, Nicaragua, China e India. Además, también son productores Bolivia, Camerún, Costa Rica, Cuba, El Salvador, Ecuador, Haití, la isla de Java, Jamaica, Kenia, Panamá, Puerto Rico, República Dominicana, Tanzania y Venezuela.



Fuente: Organización internacional del café, 2016.

Figura 1- 2 Variedad de grano de café

1.2.2.2 Coffea canephora

Coffea canephora también llamado cafeto robusta ofrece una bebida rica en cafeína; fuerte y más ácido, usualmente usado para la fabricación de café soluble o instantáneo y mezclas. Se caracterizan por una forma más redondeada y circular, y una raya divisoria rectilínea. Es la variedad que aporta un sabor más fuerte, amargo y le da cuerpo a la bebida (más densa), generando una bebida de menor calidad, pero con mayor cafeína.

El robusta se adapta a terrenos llanos, con rendimientos más elevados. Es originario del Congo Belga. Hoy en día los diez países con mayor producción de café robusta son: Vietnam, Brasil, Indonesia, Uganda, India, Malasia, Costa de Marfil, Tailandia, Tanzania y Laos.

Tabla I-1: Tipos de Café y Países que lo producen

	Tipo	País
América	Robusta	Brasil, Ecuador.
	Arábica	Brasil, Paraguay, Ecuador, Colombia, Bolivia, Costa Rica, Cuba, El Salvador, Puerto Rico, Guatemala, etc.
Asia	Robusta	Filipinas, India, Laos, Malasia, Tailandia, Vietnam, Sri Lanka.
	Arábica	Indonesia, Papua New Guinea.
África	Robusta	Angola, Benín, Camerún, Congo, Costa de Marfil, Ghana, Guinea, Gabón, Liberia, Nigeria.
	Arábica	Etiopia, Kenia, Tanzania, Burundi, Camerún, Congo, Madagascar, Malawi, Nigeria, Ruanda Zambia.

Fuente: FAOSTAT, 2016.

Las variedades de café tienen características diferentes tanto físicas, como en su cultivo, el precio comercial, la producción por arbusto, acidez y sabor en la bebida, y se describen en la siguiente tabla I-2.

Tabla I-2: Comparación entre el café robusta y el café arábico

	Robusta	Arábica
Zona de cultivo (sobre nivel del mar)	200 – 700 m	900 – 2000 m
Producción por planta	1,5 – 2,5 kg/año	0,5 – 1,0 kg/año
Precio del grano	Bajo	Alto
Forma del grano	Redondo	Ovalado
Color del grano	Pálido	Verde azulado
Densidad Aparente	0,68 g/cc	0,60 g/cc
Acidez	Baja	Alta
Sabor de la bebida	Amargo	Afrutado

Fuente: Organización internacional del café, 2016.

La composición química del grano de café varía según el tipo de grano. A continuación, se muestra la composición química del grano de café según su variedad.

Tabla I-3: Composición química del grano del café

Componente Químico	Arábica (%)	Robusta (%)
Polisacáridos	50,8	56,4
Sacarosa	8	4
Azúcares reductores	0,1	0,4
Proteínas	9,8	9,5
Aminoácidos	0,5	0,8
Cafeína	1,2	2,2
Trigonelina	1	0,7
Lípidos	16,2	10
Ácidos alifáticos	1,1	1,2
Ácidos clorogénicos	6,9	10,4
Minerales	4,2	4,4
Compuestos aromáticos	Trazas	Trazas

Fuente: ILLY, A.; VIANI, R. (2015). Espresso coffee: the science of quality. Ámsterdam: Elsevier, 2015. 398p.

1.2.3 Borra de café

La borra de café es el residuo de café molido que se queda en el filtro de cafeteras o en la manga de tela que se utiliza para colar el café diariamente, que se obtiene después de extraer la bebida altamente estimulante por su alto contenido de cafeína.

La borra de café es el café molido agotado su bebida estimulante, que consiste en el café tostado y molido que ya se le fue extraído sus compuestos solubles en agua. La

borra de café es la materia insoluble que no ha sido disuelto en el proceso de extracción de la bebida denominada café y que fue tratada con agua a temperaturas de 100°C.

Contiene una humedad entre 75 a 85%. La borra de café tiene un contenido de aceite entre el 10% y el 15% en base seca. (Calle, H. 2014). En el proceso de extracción de los sólidos solubles en agua, solo 1% del aceite de café es transferido al extracto, lo restante queda contenido en la borra de café. Este aceite es fácilmente extraíble con disolventes orgánicos.

Su apariencia física muestra una borra de color café oscuro cuando presenta una humedad del 80% y café claro cuando el nivel de humedad es reducido entre 5% - 10%, además contiene semillas sin moler, materiales extraños como palos, granos por triturar, etc.

La siguiente tabla presenta un análisis físico-químico de la borra de Café:

Tabla I-4: Análisis físico-químico de la borra de café

Densidad aparente	0,28 gr/cc
Humedad	5 - 10 %
Cenizas	0,8 - 0,6 %
Carbohidratos	34-39%
Aceites	10 -15 %
Proteínas	14 - 15%
Lignina	8,74 – 9,15%
Taninos	0,78 – 5,6 %
Celulosas y Hemicelulosas	36 - 37%
Cafeína trigonelina	fracciones

Fuente: Calle V., H. Subproductos del Café. Chinchiná (Colombia). Cenicafé. 2014.

La borra de café como desecho está compuesto de los siguientes:

- **Componentes Nitrogenados:** Éstos comprenden las proteínas, los aminoácidos, la trigonelina y los alcaloides, pero durante el tostado se descomponen en ácido nicotínico, piridina y otros compuestos volátiles.
- **Ácidos Clorogénicos:** Éstos comprenden varios ésteres de ácidos químicos y representan del 7% al 10% que se reduce durante el tueste.

El ácido clorogénico es un compuesto polifenólico, presente en el café verde en un porcentaje entre 6.5 a 10, dependiendo del tipo de café, y es el encargado de aportar el cuerpo, sabor amargo y astringencia a la bebida.

- **Ácidos Carboxílicos:** El tueste genera otros ácidos que aumentan las proporciones del ácido químico al descomponerse los ácidos clorogénicos.
- **Lípidos:** Éstos constituyen del 8% al 10% de la materia seca.
- **Componentes Volátiles:** Existen diferentes solventes para la extracción, como metanol, etanol, agua y hexano (WATERMAN y MOLE, 1994).

La borra de café está constituida principalmente por los siguientes compuestos:

- **Celulosa:** Cadenas largas de grupos anhidro glucosa que puede ser usada para fabricar papel.
- **Hemicelulosa:** Conformadas por hexosanos, pentosanos y poliuronidas, las cuales se descomponen en hexosas, pentosas y ácidos urónicos.
- **Lignina:** Compuesto con alto contenido en carbono.
- **Taninos:** Compuesto polifenólico. Los taninos presentes en el café son el catecol (1,2-dihidroxibenceno) y el pirogalol (1,2,3-trihidroxibenceno). Estos compuestos se forman en la torrefacción del grano de café, aunque los taninos hidrolizables derivados del pirogalol, son solubles en agua, por lo que posiblemente ya no estén presentes en la borra de café.

1.3 Aceite de la borra de café

La palabra *aceite* proviene del árabe az-zait, el jugo de la aceituna, y éste del arameo zayta, 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.

Los aceites son un tipo de lípidos llamados acilgliceroles, o también triglicéridos o triacilgliceroles porque están compuestos de una molécula de glicerina o glicerol (alcohol) que tiene ácidos grasos en tres posiciones.

Estos ácidos grasos pueden ser saturados cuando no tienen dobles enlaces en la molécula, monoinsaturados si hay un solo enlace doble e insaturados o poliinsaturados si poseen más de uno. Pueden ser los tres iguales y uno diferente, o los tres diferentes. Los ácidos grasos más comunes son el palmítico con 16 carbonos en su molécula representada por C16:0, el esteárico C18:0, oleico C18:1, linoleico C18:2 y linolénico C18:3. Los números en la nomenclatura indican la cantidad de carbonos y de dobles

ligaduras o enlaces. En total hay más de 50 tipos diferentes. En el aceite, aparte de los triglicéridos suele haber ácidos grasos no combinados que le otorgan acidez al aceite y se denominan ácidos libres.

El *aceite de la borra de café* es un producto que se extrae a partir de la borra de café, remanente del lixiviado de la bebida del café, obtenidas de los granos tostados y molidos de los frutos de cafeto. El método de extracción del aceite puede efectuarse por dos métodos: empleando un solvente orgánico o mediante el prensado en frío, sin embargo, debido al bajo rendimiento de esta última técnica se opta por procedimientos químicos de extracción como ser la extracción con solvente orgánico.

El resultado es un producto de color café oscuro, con un característico aceitoso amargo intenso, aromático a café tostado, rico en antioxidantes y ácidos grasos indispensables. De acuerdo a Calle, D., Mendoza, J. (2017), indican que durante el proceso de extracción solo el 1% del aceite de café es transferido al extracto comprobando que extracciones de aceites en café tostado de distintos grados de tueste, se obtiene rendimientos entre 28 a 38g por cada 250g de café tostado, equivalentes al 11,2 – 15,2%. Posteriormente el aceite extraído en la borra de café se obtiene rendimientos entre 26 a 37g por cada 250g de café tostado, equivalentes a 10,4 – 14,8%, comprobándose que muy poco aceite pasa a la bebida y éste puede recuperarse con solventes orgánicos.

1.3.1 Componentes y propiedades del aceite de la borra de café

El aceite de café contiene sustancias grasas, su presencia es capaz de influenciar la conservación de sus cualidades organolépticas. En general, la utilización de los aceites depende de los constituyentes identificados en estos. La presencia o ausencia de unos u otros depende de características como: condiciones geobotánicas (suelo, luz, humedad y la altitud), almacenamiento de material vegetal, método de obtención del aceite (maceración, prensado, extracción por solvente, tipo de solvente, etc.).

La siguiente tabla muestra las características del aceite de la borra de café, donde se observa:

Tabla I-5: Características del aceite de la borra de café

Índice de Yodo	97,6%
Índice de saponificación (mg KOH/ g)	180,6
Acidez libre en ácido oleico	0,27%
Insaponificables	5,84%
Índice de peróxidos	5,20%

Fuente: Aceite de café (Ecuador), 2012.

Las propiedades sensoriales u organolépticas que presenta el aceite de café extraído.

- **Olor:** Posee un olor característico a café tostado.
- **Sabor:** Característico aceitosos amargo intenso.
- **Color:** Café oscuro.
- **Aspecto:** El producto, a temperatura ambiente consiste en un líquido viscoso oscuro brillante.

1.3.2 Análisis físico-químico del aceite de la borra de café

Entre los análisis físico-químicos más importantes que se deben realizar al aceite de bagazo de café, se encuentran los siguientes:

1.3.2.1 Físicos

- **Viscosidad dinámica:** Es la resistencia interna entre las moléculas de un fluido en movimiento y determina las fuerzas que lo mueven y deforman.
- **Viscosidad cinemática:** Es una medida de la resistencia interna de un fluido a fluir bajo fuerzas gravitacionales.
- **Densidad:** Es la relación entre el peso y el volumen que ocupa el aceite, y en este caso está afectada por la temperatura.
- **Índice de refracción,** Medida del cambio de velocidad y dirección de una onda de luz particular al moverse a través de una sustancia específica.

En la siguiente tabla se muestran las propiedades físicas del aceite de bagazo de café.

Tabla I-6: Propiedades físicas del aceite de la borra de café

Aceite De Café	Cantidad	Temperatura °C
Densidad (gr/cm ³)	0,923	23,2
Viscosidad dinámica (Pa/s)	0,1	26
Viscosidad cinemática (mm ² /s)	31,25	
Índice de refracción	1,478	22,5
pH	4,58	22
Punto de fusión		15
Solubilidad		
Etanol		negativa
Benceno		positiva
Cloroformo		positiva

Fuente: Análisis del aceite extraído del bagazo de café (Ecuador).

1.3.2.2 Químico

- **Índice de saponificación:** Se denomina al número de miligramos de KOH que se necesita para neutralizar todos los ácidos grasos (libres y ligados en forma de glicéridos) contenidos en 1 g de aceite o grasa.
- **Índice de Peróxidos:** Es el número de mili equivalentes de oxígeno activo contenidos por gramo de muestra.
- **Índice de Acidez:** Es el número de miligramos de KOH que se requieren para neutralizar los ácidos grasos libres contenidos en un gramo de grasa.
- **Índice de fosforo:** Describe el pre envejecimiento del aceite. Si su valor es demasiado bajo, indica que el aceite está degradado. El fósforo en los aceites vegetales está presente como fosfolípidos. A mayor contenido en fosfolípidos se reduce la estabilidad a la oxidación.
- **Valor fosfátidos:** Indica el nivel de fosfátidos en mg/l (ppm) en aceite multiplicando el contenido de fósforo en ppm por 30.
- **Valor de p-anisidina:** Medida del aldehído contenido en una grasa o un aceite. Debido a que los aldehídos son productos secundarios de la oxidación generados durante la oxidación de lípidos, el valor p-anisidina mide el estado oxidativo de la grasa o del aceite, en relación con la calidad de su sabor.

- **Valor totox:** Indica la calidad de una grasa o aceite, determinando así su grado de oxidación, tal que no dificultaría su proceso de refinación.

Tabla I-7: Propiedades químicas del aceite de la borra de café

Aceite De Café	Cantidad	Unidades
Índice de DOBI	0,025	
Carotenos	38,032	ppm/g (muestra)
Materia no saponificable	1,68	%
Valor de fósforo	334,7	ppm/g (muestra)
Valor de fosfátidos	10039,8	ppm/g (muestra)
Valor de p-Anisidina	42,26	ppm/g (muestra)
Valor de Totox	86,018	

Fuente: Análisis del aceite extraído del bagazo de café (Ecuador).

Cabe mencionar que las propiedades físicas y químicas del aceite de la borra de café varían bastante dependiendo del país de procedencia de los granos de tostados y molidos obtenida de la planta de Cafeto y del método de extracción utilizado. Influye más el origen de la materia prima que si se extrae por prensado en frío o mediante extracción por solvente.

1.3.3 Factores que influyen en la calidad del aceite de la borra de café

Los factores que afectan la calidad del aceite de la borra de café, son aquellos que producen procesos como la oxidación, la hidrólisis que se refleja en el aumento de la acidez del mismo y el inadecuado acopio o almacenamiento de la borra. Así, no es aconsejable el contacto con el agua, el aire y altas temperaturas.

1.3.3.1 Oxidación

Las reacciones de oxidación de los aceites se producen fundamentalmente en los ácidos grasos insaturados de los triglicéridos. El oxígeno atmosférico reacciona con el aceite en la superficie de contacto y ataca a los dobles enlaces y como consecuencia se pueden producir olores desagradables en los aceites.

Es la única reacción química de deterioro que normalmente se desarrolla durante el período de almacenamiento. Algunos metales, tales como el cobre y el hierro, aceleran la oxidación de las grasas y deben ser evitados. Este tipo de oxidación es de dos tipos:

- **Fotooxidación:** Oxidación producida por el oxígeno atmosférico activado por la luz.

- **Autooxidación:** Oxidación desencadenada por un iniciador que puede ser un compuesto formado por la oxidación o por trazas de metales.

1.3.1.2 Hidrólisis

La humedad presente o añadida en la borra de café, ataca a los triglicéridos (componente principal del aceite) produce glicerina y ácidos grasos libres que aumentan la acidez, esta reacción se da a una temperatura concreta y con la presencia de enzimas. Se produce un aumento de la acidez del aceite como consecuencia de los procesos hidrolíticos.

1.3.1.3 Inadecuado almacenamiento

El almacenamiento de la borra de café debe de tener un contenido mínimo de humedad para la extracción del aceite, evitando cualquier exposición a las condiciones atmosféricas, como viento y polvos, lo cual influye en el desarrollo de microorganismos que dañan y contaminan la borra de café.

La obtención de un aceite conlleva la vigilancia de todos los procesos de su elaboración, desde el acopio de la materia prima, almacenamiento y extracción.

1.4 Teoría de la extracción sólido-líquido

Como se menciona en párrafos anteriores la extracción sólido-líquido usando solventes orgánicos es la de mayor rendimiento, por lo que analizaremos este proceso.

1.4.1 Definición

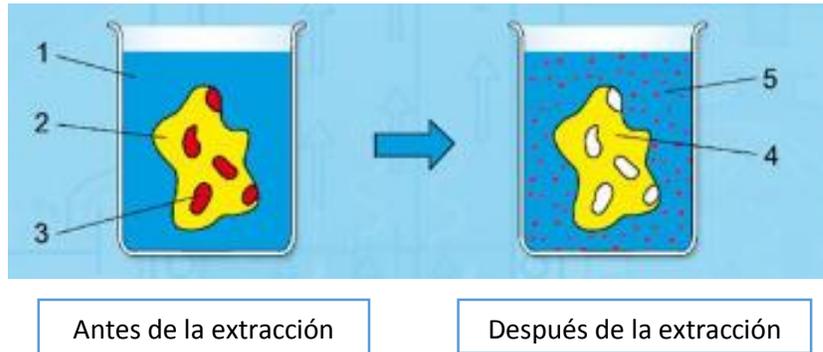
La extracción es una operación básica de transferencia de materia basada en la disolución preferente de uno o más componentes de una mezcla sólida, empleando un solvente adecuado en el que es insoluble el resto de los sólidos, que se denominan inertes o insolubles. La extracción en este caso particular sólido-líquido se conoce también como lixiviación y se aplica solamente a las operaciones en que existen dos fases, una fase sólida y la otra líquida.

Ambas fases entran en contacto íntimo y el soluto o los solutos pueden difundirse desde el sólido a la fase líquida, lo que produce una separación de los componentes originales del sólido.

La extracción tiene lugar en dos etapas:

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

A continuación, se muestra un esquema del proceso de extracción.



Esquema de la extracción: 1 Solvente, 2 material de extracción (sólido + soluto), 3 soluto, 4 sólido lixiviado, 5 miscela (solvente + soluto).

El proceso completo de extracción suele comprender la recuperación por separado del solvente y del soluto, pero ello se efectúa por otro tipo de proceso, como la evaporación o la destilación.

1.4.2 Variables que influyen en la velocidad de extracción

1.4.2.1 Tamaño de partícula

Es importante tener un tamaño adecuado de las partículas sólidas, de tal manera que se tenga un material particulado que alcance una buena superficie de contacto, sin ser un material muy fino que dificulte su manipulación e incremente la energía para su reducción de tamaño. De ahí la importancia del tamaño de la partícula para incrementar el área de contacto entre el sólido y el líquido extractor, favoreciendo la velocidad de transferencia de materia del sólido al solvente. Así mismo, se ve favorecida la difusión del soluto hacia el solvente por la menor distancia que ha de recorrer el soluto por el interior del sólido.

Generalmente, es aconsejable que la gama de tamaños de partículas sea pequeña y homogénea, para que cada partícula requiera aproximadamente el mismo tiempo de extracción, y particularmente debe evitarse la producción de gran cantidad de finos, ya

que este puede alojarse en los intersticios de las partículas de mayor tamaño, impidiendo así el flujo del disolvente.

De acuerdo a Vargas, P. (2008), para lograr una adecuada extracción, se recomienda reducir el tamaño de las partículas, hasta un diámetro de 0,6 mm que corresponde a un tamiz vibratorio con malla número 28 en la serie Tyler.

1.4.2.2 Selectividad del líquido extractor o solvente

El líquido escogido debe ser un solvente selectivo, con una viscosidad lo suficientemente baja para facilitar su flujo a través del sólido y de bajo punto de ebullición para que el extracto pueda concentrarse por la evaporación del solvente (Lawrence J. 1984).

Por lo general, se utiliza un solvente relativamente puro, pero a medida que transcurre la extracción, la concentración del soluto aumentará y la velocidad de extracción disminuirá progresivamente, en primer lugar, debido a la disminución del gradiente de concentración y en segundo lugar por el aumento de la disolución.

1.4.2.3 Temperatura de extracción

Siempre es un factor favorecedor del proceso para la velocidad de extracción. Un incremento de temperatura del solvente acelera la velocidad de extracción debido a la disminución de la viscosidad del líquido que incrementa el coeficiente de difusión. La temperatura máxima de difusión está limitada por la temperatura de ebullición del solvente, la estabilidad del producto o solvente, o factores económicos. Las temperaturas altas producen solubilidades superiores del soluto en el solvente y por consiguiente la concentración del soluto es alta en el extracto. Sin embargo, en el tratamiento a temperaturas altas en el caso de algunos materiales de origen natural, como el café, té, remolachas, resulta una extracción excesiva de materiales no deseados. Las operaciones a temperaturas altas no pueden ser permisibles debido a las pérdidas inaceptables de solventes y por consideraciones de seguridad. Existe la necesidad de tener experiencia en la selección de una temperatura adecuada.

1.4.2.4 Tiempo de extracción

El tiempo de extracción es un factor muy importante y debe ser suficiente para permitir la separación de los compuestos de interés, aunque se debe prestar cuidado para que no sea excesivo, por lo que se determinará el tiempo óptimo de extracción.

Sin embargo, el tiempo de extracción está relacionado con el tamaño de la partícula y la calidad del solvente, para alcanzar un determinado rendimiento y tiene su efecto en el tamaño de los equipos de extracción y en el costo de producción.

1.5 Procedimientos de extracción de aceite de la borra de café

El aceite está contenido en pequeñas celdas dentro del grano de la borra de café que deben romperse para extraerlo ya sea por medios mecánicos, químicos, etc.

Para extraer el aceite crudo de bagazo de café se suelen utilizar dos procesos diferentes los cuales se citan a continuación.

1.5.1 Extracción en laboratorio del aceite de la borra de café

La extracción en laboratorio la constituye la extracción Soxhlet y es un ejemplo claro de extracción con solvente.

1.5.1.1 Extracción soxhlet

La extracción Soxhlet fue diseñada por el químico alemán Franz Von Soxhlet en 1879. La extracción por Soxhlet es una operación de transferencia de masa, donde un solvente orgánico, extrae selectivamente en nuestro caso al aceite que se halla dentro de la borra de café.

El extractor Soxhlet es un equipo que suele utilizar en experimentos de laboratorio, aunque en instalaciones de pequeña capacidad y otros de funcionamiento análogo también se aplica.

La gran ventaja del Soxhlet es la eficacia en el proceso de remojo en la fase sólida, realizando un sin fin de extracciones de manera continua, llegando siempre de manera pura al sólido (Nuñez C. E., 2007).

1.5.1.2 Descripción del equipo de extracción: Soxhlet

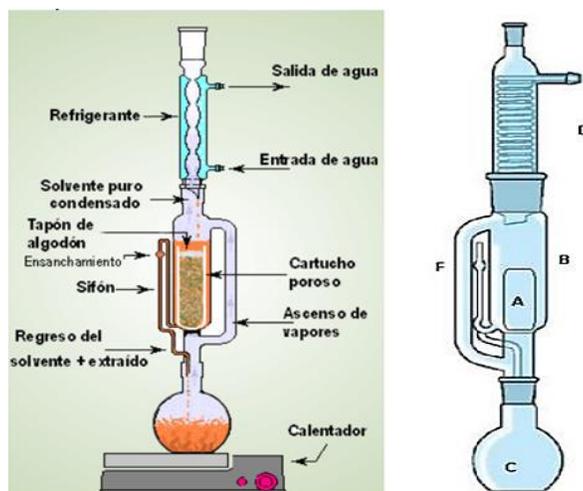
El equipo Soxhlet tiene como función recircular los vapores condensados con ayuda de un sifón a la fuente de disolvente que se encuentra en evaporación continua, arrastrando

consigo los principios activos de la materia prima contenido en los cartuchos desechables. La capacidad aproximada en un equipo de laboratorio es de 500 ml de volumen primario con una recirculación de 100 ml cada cinco minutos aproximadamente en estado estable. La velocidad de reflujo depende directamente de la eficiencia y el tamaño del condensador.

La sustancia sólida se introduce en un cartucho poroso (generalmente hecho con papel de filtro, que permite al solvente entrar y salir reteniendo al sólido) que se coloca dentro del recipiente (B). Se adosa un balón (C) a dicho recipiente donde se coloca el volumen de solvente que se utilizará en la extracción. Por el extremo superior del recipiente (B), se coloca un condensador (D).

El solvente se calienta; los vapores ascienden por el tubo (E), condensan en el refrigerante (D) y caen dentro del recipiente (B) impregnando al sólido que se encuentra en el cartucho (A). El recipiente (B) se va llenando lentamente de líquido hasta que llega al tope del tubo (F) y se descarga dentro del balón (C) por efecto de sifón, llevando consigo a la sustancia extraída. El proceso se repite continuamente hasta que la extracción sea completa. El solvente de extracción se evapora, recuperando así a la sustancia deseada.

En la Fig. 1-3, se describe visualmente las partes del aparato Soxhlet para comprender su funcionamiento.



Fuente: Núñez, 2008, citado en Valencia, 2019
Figura 1-3 Equipo de Soxhlet, Extracción de aceites por solvente.

1.5.1.3 Solvente

El solvente es también conocido como disolvente, ya que el soluto al entrar en contacto con el solvente, este se esparce por todo el espacio del solvente y por ser este último de mayor cantidad, envuelve y nutre a las moléculas del soluto formando un compuesto con propiedades combinadas del sólido y líquido, este proceso es conocido en la preparación de soluciones como solvatación.

El solvente es una sustancia que forma parte en mayor cantidad de una solución. La solución es compuesta por la combinación y tratamiento de un soluto (en menor cantidad, por lo general sólido o líquido, pero con mayor concentración) y un solvente (líquido con propiedades propicias para que ese soluto se disuelva correctamente). El soluto universal es el agua, por su neutralidad en el proceso y su fácil adaptación a la transformación de nuevas moléculas de otros elementos.

1.5.1.4 Características para la extracción con el equipo soxhlet

Para la extracción con el equipo Soxhlet se deben tener en cuenta: la selección del solvente, la matriz sólida y las condiciones de operación.

a. Selección del solvente

Debe seleccionarse un solvente conveniente de tal forma que ofrezca el mejor balance de varias características deseables:

- Alto límite de saturación y selectividad respecto al soluto por extraer.
- Capacidad para producir el material extraído con una calidad no alterada por el disolvente.
- Estabilidad química en las condiciones del proceso.
- Baja viscosidad, baja presión de vapor.
- Baja toxicidad e inflamabilidad.
- Baja densidad.
- Baja tensión superficial.
- Facilidad y economía de recuperación de la corriente de extracto y bajo costo.

Cada solvente diferente produce extractos y composiciones específicos.

b. Características de la matriz sólida

La extracción con Soxhlet depende fuertemente de las características de la matriz sólida y de las dimensiones de las partículas puesto que la difusión interna puede ser el paso limitante durante la extracción. Donde se requiere de un menor tiempo de extracción con una buena eficiencia si el tamaño de partícula es menor, mientras que si las dimensiones de las partículas son mayores la extracción sólido -líquido se realizará en un mayor tiempo.

1.5.1.5 Ventajas y desventajas de la extracción Soxhlet

Ventajas:

- Gran capacidad de recuperación e instrumentación simple.
- No se requiere filtración posterior. El disolvente orgánico se evapora quedando sólo analito.
- El disolvente y la muestra están en contacto íntimo y repetidas veces con porciones frescas de disolvente.
- La extracción se realiza con el disolvente caliente, así se favorece la solubilidad de los analitos.

Desventajas:

- Es un proceso lento e imposible de acelerar. No es posible la agitación del sistema, la cual podría acelerar el proceso de extracción.
- Se requiere gran cantidad de disolvente.
- La descomposición térmica de los analitos termolábiles, ya que la temperatura del disolvente orgánico está próxima a su punto de ebullición.
- Es necesaria una etapa final de evaporación del disolvente para la concentración de los analitos.

1.5.1.6 Selección del solvente para la extracción de aceite de la borra de café

De acuerdo a WATERMAN., MOLE, (1994), la selección del solvente para la extracción sólido -líquido fue estudiada en base a las reacciones que se pueden producir con los compuestos presentes en la borra de café. Donde existen solventes para extraer aceite, como metanol, etanol, agua y hexano.

Según estudios los tres diferentes solventes descartados son por las siguientes razones:

- **El Agua** no, porque la borra es proveniente de la extracción de los sólidos solubles del café, por lo tanto, los compuestos solubles en agua ya fueron extraídos y desplazados en la bebida.
- **El Metanol** no, porque es muy tóxico, y ocasiona la metanólisis de los dépsidos gálicos (unidos entre sí por un enlace de éster) enlazados.
- El **Hexano** no, por su toxicología, es uno de los alcanos tóxicos, debido a su efecto fisiológico que proviene de los productos de su metabolización, como la 2,5-hexadiona, ya que este compuesto reacciona con aminas esenciales para el funcionamiento de las células nerviosas, por lo tanto, es neurotóxico.
- El **Etanol** sí, porque es de fácil manejo, menos tóxico, no presenta reacciones indeseadas en la extracción, y produce un mayor rendimiento en la extracción.

1.5.1.7 Etanol

El etanol, también llamado alcohol etílico, es un compuesto químico orgánico alifático con un grupo funcional hidroxilo, formando parte de la familia de los alcoholes, de fórmula empírica C_2H_6O . Su fórmula química semidesarrollada es CH_3-CH_2-OH , y peso molecular de 46,0684 g/mol. Es un alcohol que en condiciones normales de presión y temperatura se presenta como un líquido incoloro, con un olor etéreo muy penetrante (aunque no desagradable) y es muy inflamable. Tiene una temperatura de ebullición de 78,4 °C. Miscible en agua en cualquier proporción, la concentración de 96 % en peso forma una mezcla azeotrópica.

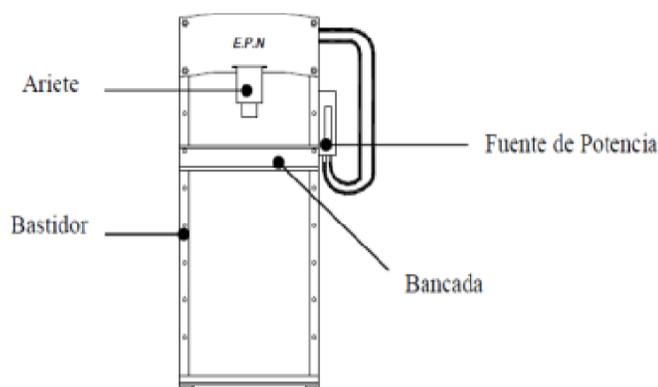
Tabla I-8: Propiedades físicas y químicas del etanol

Propiedades físicas y químicas del etanol	
Apariencia	Líquido claro
Olor	Alcohol concentrado
Punto de ebullición, (1 atm)	78 °C
Densidad	0,789 g/cm ³
Solubilidad en agua	Miscible
pH	7
Temperatura de auto ignición	363 °C
Límite inferior de inflamabilidad	3,5 (% Vol. en aire)
Punto de fusión	-117 °C

Fuente: Quimipac, 2020

1.5.2 Extracción por prensado

Este proceso consiste en un sistema de prensado o compresión del material, con lo que se logra la separación del aceite, del resto de los componentes del material. Esta técnica podría dar un buen rendimiento, pero no es totalmente satisfactoria desde el punto de vista de la calidad del aceite obtenido que, si bien puede presentar una buena resistencia a la oxidación en estado bruto, presenta una menor resistencia a la oxidación una vez desodorizado, operación casi obligatoria a causa del olor a quemado generado por el propio proceso de prensado como lo mencionan Reglero, G., Santa, M. (2003). Además, infiere que el aceite de borra de café por este método, presenta un contenido inferior de antioxidantes que el aceite logrado con fluidos supercríticos.



Fuente: Méndez, 2012, citado en Valencia 2019
Figura 1-4 Equipo de Prensado

1.5.2.1 Prensado discontinuo

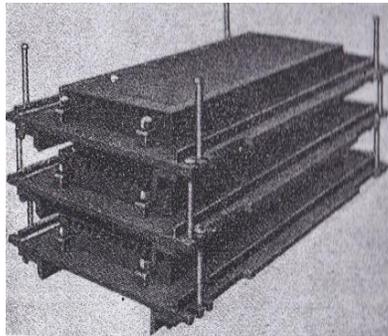
Este tipo de prensado es el más utilizado desde tiempos antiguos para la extracción de aceites vegetales de consumo humano, para ello se aplica presión sobre una masa de vegetales confinados en bolsa, telas, mallas u otros.; pero el más utilizado fue el sistema hidráulico (Bailey, 2001, p. 440; Valderrama, 1994, p.92).

Las prensas discontinuas se clasifican en dos grupos; tipo abierto y tipo cerrando.

a. Prensas discontinuas tipo abierto

En este tipo de prensas las semillas deben estar confinadas en filtros de tela. Las prensas de este tipo se componen generalmente de cuatro columnas verticales, dentro de la jaula

abierta formada por dichas columnas, existe una serie de placas horizontales, que poseen un espacio entre 0,075 a 0,125 m. Debajo del conjunto de placas y unida a un vástago accionado también por debajo, existen una placa de fondo, más pesada. Al levantar el vástago, las dichas tortas sufren una compresión, que hace que el aceite fluya de las mismas y caiga dentro de una bandeja, colocada sobre el bloque de fondo (Bailey, 2001, p.442; Valderrama 1994, p .92).

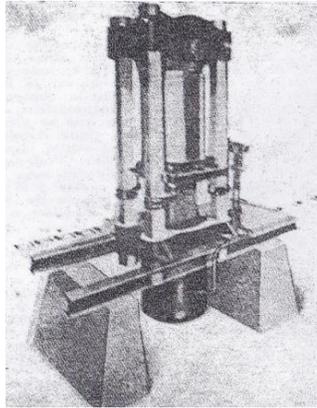


Fuente: Bailey, 2001, p. 442.

Figura 1-5 Esquema de dispositivos de cajetines para el empleo en prensas de abierto

b. Prensas discontinuas tipo cerrado

En este tipo de prensado las semillas no deben estar confinadas en filtros, sino que son colocados en una especie de jaula. Con este tipo de prensas se alcanzarán mayores presiones que con las prensas de tipo abierto, y son ideales para semillas duras, que poseen mucho aceite y poca fibra como son la copra y el palmiste (Bailey, 2001, p.444; Plank, 2005, p.460).



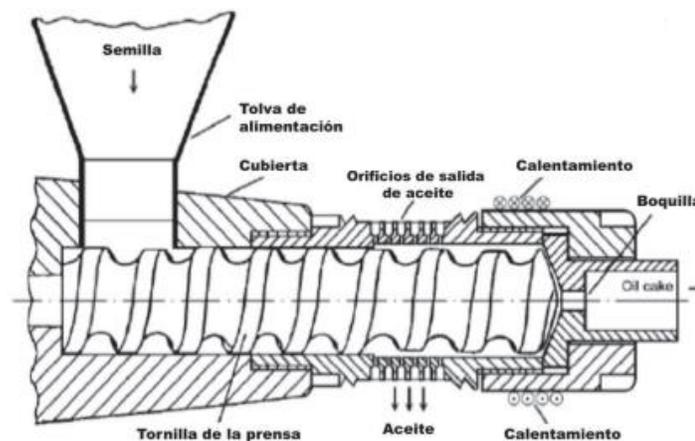
Fuente: Bailey, 2001, p. 444.

Figura 1-6 Prensa de jaula tipo cerrado

1.5.2.2 Prensado continuo

El prensado continuo es realizado de forma común en las prensas expeller o tornillo. Estas prensas soportan altas presiones; generalmente se practica el prensado en dos o tres prensadas, incrementando en cada una de ellas la presión (Bailey, 2001).

Existen varios tipos o modelos de prensas expeller, siendo dos los principales diseños, los cuales se diferencian principalmente por la geometría de tornillos, el tipo de restricción o boquilla, la salida del aceite y de la torta residual (Beerens.2007, p.14).



Fuente: Beerens, 2007, p. 22.

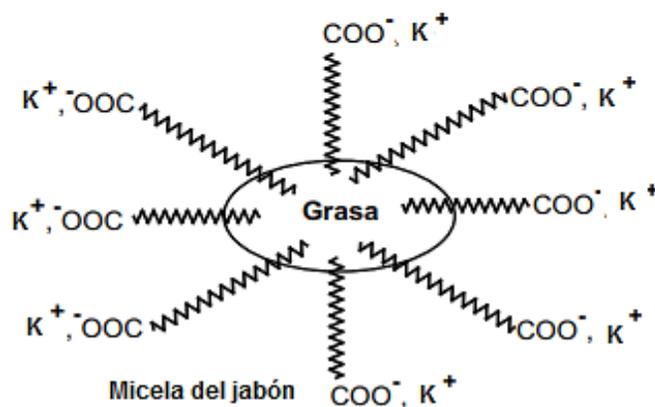
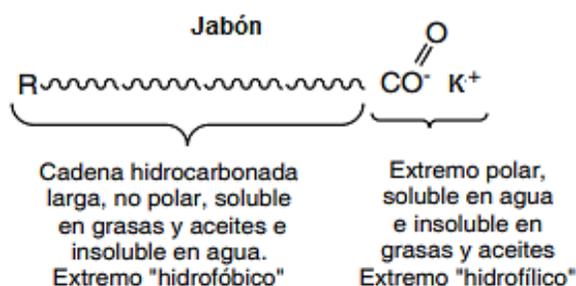
Figura 1-7 Prensa cilindro con agujeros utilizada para la extracción de aceites vegetales comestibles

1.6 Saponificación

La saponificación proviene del latín saponis, que significa jabón. La saponificación se descubrió 500 años a.C. El jabón se fabrica por hidrólisis básica o alcalina de las grasas por un mecanismo de sustitución acil-nucleofílica. Cuando se hidroliza la grasa con KOH en caliente, se obtiene glicerina y las correspondientes sales potásicas de los ácidos grasos. Estas sales es lo que conocemos como jabón potásico (blando). Si la hidrólisis se lleva a cabo con NaOH en caliente se obtienen jabón sódico (duro).

Los jabones en el agua forman una dispersión opaca de micelas, agregados moleculares de entre 100 - 200 unidades moleculares de jabón, con sus cabezas polares (parte hidrofílica) orientadas hacia afuera de la micela y con sus “colas” de naturaleza hidrofóbica hacia el interior de la misma.

El mecanismo de acción de los jabones en la limpieza ha sido tema de varias teorías. Según la teoría de McBain, los jabones, en solución acuosa, existen en forma de electrolitos coloidales (micelas). Estas micelas tienen un papel muy importante en la eliminación de la suciedad en el lavado y en mantener en suspensión las partículas de mugre debido a un mecanismo de interacciones hidrofóbicas e hidrofílicas. Por las fuerzas de dispersión de London (interacciones hidrofóbicas) dispersa la grasa dentro del agua y por enlaces puente de hidrógeno se estabiliza dentro de la misma.



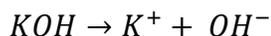
Fuente: Química Orgánica III, U.N. Ingeniería, Lima.

Figura 1-8 Mecanismo de acción de los jabones en la limpieza

Este proceso químico es utilizado como un parámetro de medición de la composición y calidad de los ácidos grasos presentes en los aceites y grasas de origen animal o vegetal, denominándose este análisis como Índice de saponificación; el cual es un método de medida para calcular el peso molecular promedio de todos los ácidos grasos presentes.

1.6.1 Álcali

Una base o álcali es una sustancia química que representa propiedades alcalinas. En primera aproximación es cualquier sustancia que en disolución acuosa aporta iones OH^- al medio. Donde un ejemplo claro es el hidróxido de potasio, de fórmula KOH ;



El álcali es imprescindible para que se produzca la reacción de saponificación, pero hay que tener en cuenta que por sí solo es un elemento cáustico muy peligroso, cuyo

manejo implica tomar una serie de precauciones muy importantes para manipularlo con seguridad. Los álcalis más utilizados en la fabricación del jabón son la sosa (hidróxido sódico, NaOH) y la potasa (hidróxido potásico, KOH).

1.6.2 Hidróxido de potasio

El hidróxido de potasio es (KOH), también conocido como potasa cáustica es un compuesto químico inorgánico, sólido grumoso o escamoso, que es inodoro y blanco o ligeramente amarillo. Tanto él como el hidróxido de sodio (NaOH) son bases fuertes de uso común. El hidróxido de potasio es higroscópico absorbiendo agua de la atmósfera, por lo que termina en el aire libre. Por ello, el hidróxido de potasio contiene cantidades variables de agua. Su disolución en agua es altamente exotérmica, con lo que la temperatura de la disolución aumenta, llegando incluso, a veces, al punto de ebullición.

El hidróxido de potasio es especialmente significativo por ser el precursor de la mayoría de jabones suaves y líquidos.

La saponificación de grasas con esta base se utiliza para preparar los correspondientes "jabones de potasio", que son más suaves que los jabones derivados del hidróxido de sodio. Debido a su suavidad y mayor solubilidad, los jabones de potasio necesitan menos agua para licuificarse, y por tanto pueden contener más cantidad de agente limpiador de la que los jabones licuificados basados en sodio posee. (Wikipedia, 2010)

1.6.2.1 Propiedades físicas y químicas

a. Propiedades físicas

Fórmula: KOH **Peso Molecular:** 56,09 gr/mol **Composición:** **K:** 69,69%, **O:** 28,52%, **H:** 1,78%

Tabla I-9: Propiedades físicas del Hidróxido de Potasio

Detalle	Valor	Unidad
Punto de ebullición	1320	° C
Punto de fusión	360	° C
Presión de vapor	30	mmHg 60 °C
Densidad	2,04	g/cm ³
Solubilidad de agua	119/100	gr/ml H ₂ O
ph de Solución a 0,01 moles	12	-

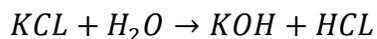
Fuente: Hoja de seguridad hidróxido de potasio, 2010

b. Propiedades químicas

El KOH es una base fuerte, reacciona violentamente con ácidos y es corrosiva en ambientes húmedos para metales tales como zinc, aluminio, estaño y plomo originando hidrógeno (gas combustible y explosivo). Rápidamente absorbe dióxido de carbono y agua a partir del aire. El contacto con la humedad o el agua puede generar desprendimiento de calor.

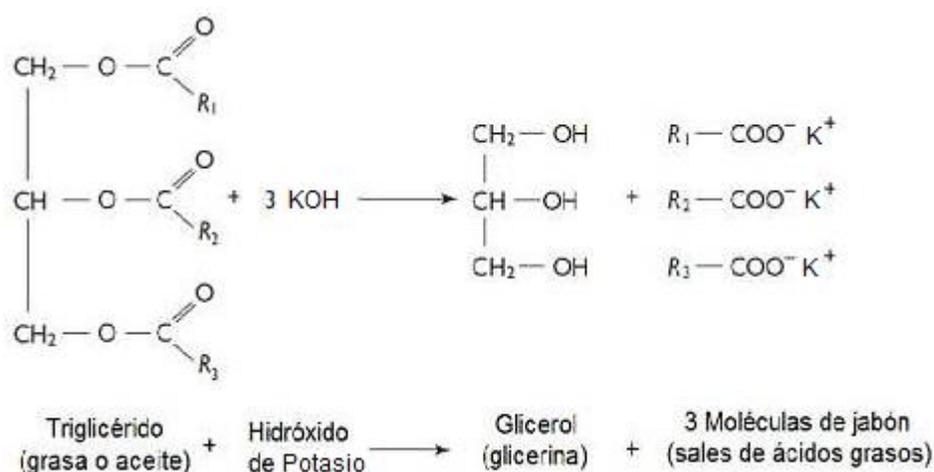
- Condiciones que deben evitarse: Contacto con la humedad o agua.
- Materiales a evitar: Ácidos, zinc, aluminio, estaño, plomo, humedad y agua.
- Productos de descomposición: No aplicable.
- Polimerización: No aplicable.

La obtención del KOH es por electrólisis de una solución concentrada de cloruro potásico.



1.6.3 Reacción química

La reacción consiste en la hidrólisis en medio básico de las grasas o lípidos, que se descomponen en sales de potasio o sodio (jabones) y glicerina, que son fácilmente extraíbles en medio acuoso, como se muestra a continuación:



Fuente: Reacción de saponificación (grasas y aceites vegetales).

Figura 1-9 Reacción Química de Saponificación

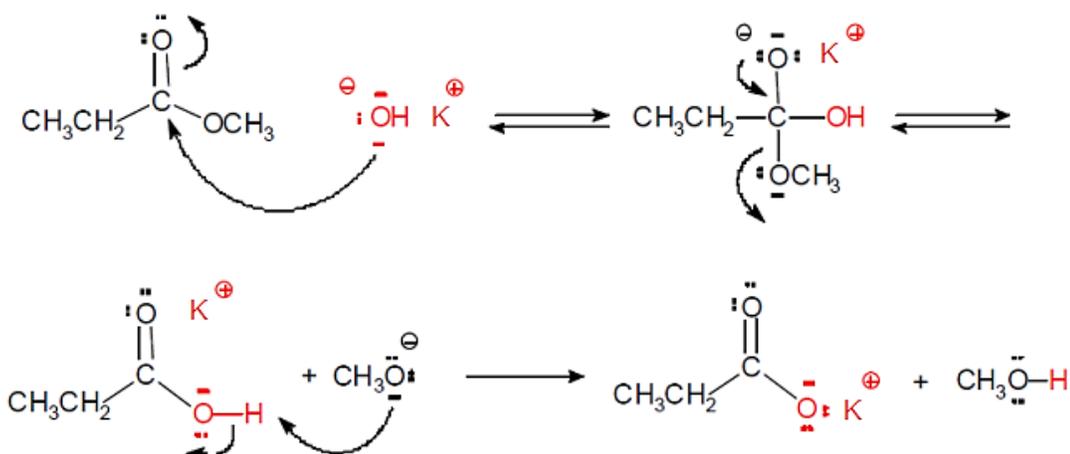
No todos los lípidos presentes en una muestra biológica dan lugar a este tipo de reacción (King, 2003).

Todas las reacciones químicas requieren que los reactivos estén en contacto, por lo tanto, es un problema que la solución cáustica (álcali) y las grasas no se mezclen. Sin embargo, las grasas y aceites aparte de contener triglicéridos siempre contienen una pequeña cantidad de ácidos grasos libres. Cuando se añade la solución alcalina a la grasa se saponifican primero los ácidos grasos libres formando porciones considerables de jabón que actúa como un excelente agente emulsionante. La grasa no saponificada se disgrega gracias a la formación del jabón, aumentando la superficie de contacto entre los reactivos, esto incrementa la velocidad de la reacción.

La misma ocurre con desprendimiento de calor, elemento muy necesario para lograr un producto de calidad, por ello mientras mayor sea el calor producido por la reacción mayor calidad tendrán los jabones producidos (transparencia y limpieza), aunque esta reacción rara vez produce el calor necesario por lo que se hace muy conveniente suministrarlo para que la neutralización de los ácidos grasos ocurra completamente lográndose así una mayor calidad en el producto.

1.6.4. Mecanismo de la reacción de saponificación

Se muestra a continuación una reacción de saponificación detallada:



Fuente: Mecanismo de reacción de saponificación, 2014

Figura 1-10 Reacción de saponificación detallada

El mecanismo de reacción requiere de un triglicérido y de un hidróxido libre. El hidróxido libre ataca a un carbono primario y se enlaza con él, robándole un par de electrones al enlace carbono-oxígeno. Esto crea a una molécula altamente inestable, que rápidamente expelle a una molécula de glicerol y renueva el doble de enlace de carbono-oxígeno. (Saponificación detallada, 2012)

La saponificación consta de dos etapas: la descomposición de los ingredientes en sus partes útiles y la reacción de estas para producir el jabón.

Las grasas y los aceites se componen de triglicéridos; y es necesario que se descomponga en ácidos grasos y glicerol. Los ácidos grasos son un elemento primordial en el proceso de elaboración de jabón blando, en cambio el glicerol, aunque es útil no es fundamental.

1.6.5 Índice de saponificación

El índice de saponificación es la cantidad en miligramos de un álcali, específicamente de hidróxido de potasio, que se necesita para saponificar un gramo de determinado aceite o grasa. Este varía para cada grasa o aceite en particular. Este dato se obtiene a partir de complejos cálculos, que se simplifican con el uso de la Tabla I-10 Índice de saponificación.

En estas tablas se registran los índices de saponificación de las sustancias, es decir la cantidad en miligramos de hidróxido de sodio o potasio, que necesitan para saponificar cada una de ellas, según la sustancia utilizada en la obtención del jabón.

A continuación, se muestra los índices de saponificación de algunos de los aceites y grasas, empleados frecuentemente, en la fabricación de jabones:

Tabla I-10: Índices de saponificación

Grasa	Sap. NaOH	Sap. KOH	Yodo	INS
Ácido Esteárico	0,134	0,188	0	188
Ácido Mirístico	0,165	0,232	0	232
Ácido oleico	0,135	0,190	86	104
Ácido Palmítico	0,148	0,208	0	208
Aguacate	0,138	0,193	86	107
Aguacate, manteca de	0,138	0,193	61	132
Albaricoque	0,136	0,191	103	88
Algodón semillas	0,138	0,194	111	83
Almendras	0,136	0,191	92	99
Avellana	0,136	0,191	89	102
Bayas de laurel	0,152	0,213	75	138
Cacahuetes	0,135	0,190	92	98
Cacao, manteca de	0,138	0,194	39	155
Café tostado (aceite)	0,140	0,197	77	120
Calabaza semillas de	0,137	0,192	112	80
Caléndula	0,136	0,191	99	92
Camelia	0,137	0,192	79	113

Fuente: Cuadro de saponificación, Mendrulandia, España.

La tabla de saponificación es necesaria para hacer los cálculos para la elaboración del jabón. Se ofrecen dos valores SAP (saponificación) para dos tipos de álcali en función de si se quiere obtener jabones sólidos o líquidos. El valor del yodo determina la tendencia al enranciamiento y el valor INS nos aproxima a las características finales de un jabón realizado con esa grasa.

1.7 Procedimiento de elaboración de jabón

El jabón es obtenido a partir de una reacción química del aceite de borra de café, en un medio alcalino, es este caso hidróxido de potasio (KOH), para la realización de un jabón líquido.

1.7.1 Modo operación

El modo de operación de cualquier planta o instalación, se basa principalmente en el funcionamiento del reactor químico, que es el núcleo del proceso.

El reactor es el equipo principal de la mayoría de procesos químicos en la industria, y la elección correcta del tipo a utilizar, puede mejorar realmente la seguridad del proceso. Algunos factores como el tamaño de la planta (producción anual), el capital del que se dispone y la complejidad relativa, entre otros, influye en la selección del modo de operación de la planta.

1.7.1.1 Proceso continuo

Los típicos reactores continuos son recipientes agitados, ya sea de modo simple o en cascada, con tuberías de flujo de descarga. En estos sistemas todos los reactivos son continuamente cargados al reactor y los productos son continuamente descargados.

Los reactores continuos se caracterizan por trabajar en condiciones estacionarias, en las que tanto el calor generado como la composición permanecen constantes durante la operación.

1.7.1.2 Proceso discontinuo (batch)

Un reactor por lotes es un recipiente agitado en el cual los reactivos son precargados y que se vacía cuando la reacción se ha completado.

La ventaja clave de este tipo de proceso es la flexibilidad. Por eso se utilizan mayoritariamente en la industria química, alimentaria o farmacéutica, donde es muy importante ofrecer una gran variedad de productos e introducir otros nuevos muy rápidamente, ya que estos sectores industriales operan en mercados altamente competitivos.

En los reactores discontinuos, todos los reactivos son cargados inicialmente en el reactor y la reacción continua hasta completarse. Se caracterizan por trabajar en condiciones no estacionarias; es decir, que durante la operación, la composición y la generación de calor cambian.

1.7.1.3 Elección del reactor

La elección del tipo de reactor debe de hacerse con el objetivo de evitar reacciones peligrosas no deseadas, maximizando la selectividad (rendimiento) del producto deseado y alcanzando una velocidad de producción elevada. En general, para producciones pequeñas, lo más adecuado es utilizar un reactor discontinuo, como es el caso.

1.7.1.4 Alternativa seleccionada

Una vez expuestas todas las posibles alternativas, dependiendo de factores tan importantes, como la materia prima de partida, el tipo de producto a obtener, la elección del modo de operación, se ha considerado que la alternativa más apropiada es:

Proceso que opera en discontinuo (Batch) y pueden distinguirse claramente tres etapas diferenciadas:

1. Purificación o tratamiento del aceite: limpieza y acondicionamiento de los aceites para su posterior conversión en jabón blando.
2. Saponificación: reacción de los aceites con la disolución alcalina para obtener el jabón blando o líquido.
3. Terminación y acondicionamiento del jabón: en ella se añaden los ingredientes que le darán al jabón sus características finales. Embotellado, taponado, etiquetado, empaquetado y distribución.

1.7.2 Proceso industrial

La utilización de esta reacción química en la industria está basada en dos métodos: por tareas (intermitente) o continuo. La elección del procedimiento y de las materias primas depende de la calidad que se quiera obtener, de la instalación para el manejo y tratamiento de las materias primas y de los medios para producir el jabón y recuperar la glicerina.

La mayor parte de las fábricas de jabón operan por el método de Calderas de plena cocción con materias grasas neutras. Con este procedimiento se producen jabones de alta calidad y productos industriales de calidad inferior y se aprovecha la glicerina.

Algunas formas para la elaboración de jabones a partir de esta reacción química:

a. Método de la cocción total

El método de la caldera o de cocción total consta de varios tiempos u operaciones, mediante los cuales se efectúa la saponificación de las materias grasas, la precipitación del jabón en la lejía de jabón concentrada, la separación de la glicerina y las materias coloreadas de la masa jabonosa por el lavado, y la cocción de acabado para dar el punto a la masa de modo que por el reposo forme un jabón limpio.

b. Método continuo con materias grasas neutras

En los últimos años, se han instalado en todo el mundo fábricas de jabón basadas en el proceso continuo. Las fases básicas de fabricación son análogas a las operaciones que se realizan en el método de caldera: Saponificación, lavado del jabón para recuperar la glicerina, acabado. Se opera en contracorriente, y el número de lavados depende de la cantidad de glicerina que ha de ser recuperada del jabón.

c. Procedimientos modificados

- Procedimiento de Semicocción: la materia grasa se mezcla con una cantidad de sosa cáustica suficiente para saponificarla por completo. La reacción se verifica mediante agitación y calentamiento con vapor cerrado. En la masa de jabón se deja la glicerina.
- Procedimiento sin caldera: el calor generado por la reacción exotérmica producida entre las grasas y el álcali se utiliza para llegar al término de la saponificación. La materia grasa se calienta hasta la temperatura conveniente y se mezcla con el álcali cáustico. Si se deja la mezcla en un recipiente aislado en el que la reacción de saponificación se produce lentamente. Este método no produce jabones de alta calidad, porque en las masas de jabón queda algo de materia grasa no saponificada.
- Procedimiento de Autoclave: el álcali reacciona con la materia grasa a temperatura y presión elevadas. Se agita la mezcla bombeándola por serpentines calentados exotérmicamente. En estas condiciones la saponificación es muy rápida. La masa caliente se somete a expansión instantánea en una cámara de vacío, en la que caen las partículas de jabón, y gran parte de la glicerina y la humedad se eliminan en fase de vapor. La glicerina se condensa de la mezcla de vapores y se recoge. Por

razón de la gran temperatura aplicada, los jabones producidos por este método suelen ser más oscuros. Este método no es de uso general.

1.8 Velocidad de reacción

La velocidad de reacción es una medida de la rapidez con que se consume un reactivo o se forma un producto. En otras palabras, es una medida de la cantidad de sustancia que se transforma en la unidad de tiempo.

En su forma más simple deseamos conocer cómo cambian con el tiempo las concentraciones de los reactantes y cómo influyen las condiciones termodinámicas en la velocidad de reacción.

La ecuación cinética y sus propiedades son el fruto directo de la observación experimental.

La experimentación demuestra que la velocidad de muchas reacciones químicas, pero no todas, se puede expresar como una ecuación algebraica en la concentración de algunos o todos sus reactantes:

$$v = k[A]^{\alpha}$$

Donde:

K es la constante de la velocidad o constante cinética, dependiente de la temperatura y la presión.

α representa el orden parcial de la reacción, normalmente números enteros o fraccionarios, que se determinan experimentalmente y que no tiene por qué mantener relación alguna con los coeficientes estequiométrico.

El motivo por el que la ecuación cinética no se ajusta normalmente a la estequiometría de la reacción es que la mayoría de procesos químicos ocurren realmente a través de una sucesión compleja de etapas que no quedan realmente reflejadas en la ecuación química global.

1.8.1 Determinación de la cinética de saponificación

Una ecuación cinética caracteriza a la velocidad de reacción y su forma puede provenir de consideraciones teóricas y/o ser el resultado de un procedimiento empírico de ajuste de curvas. En ambos casos, el valor de los coeficientes cinéticos de la ecuación solamente puede determinarse por vía experimental, ya que en la actualidad resultan inadecuados los modelos de predicción. (Levenspiel, O. 1976)

El reactor es un recipiente en el que reacciona el aceite con el hidróxido de potasio para producir jabón blando. Lo que se pretende determinar es la extensión de la reacción para diversos tiempos, que puede determinarse siguiendo la variación de un determinado componente. En este caso lo que seguiremos es el grado de conversión del producto, a diferentes tiempos; experimentalmente se han empleado métodos químicos de análisis empleados, fueron la determinación del índice de saponificación e índice de acidez, ya que el cociente entre el índice de acidez y saponificación expresa el grado de conversión. (Jurado E., 2010)

Para analizar los datos cinéticos se emplean dos métodos: el integral y el diferencial. En el método integral seleccionamos una forma de ecuación cinética. Una vez integrada esta ecuación, de su forma se deducen las coordenadas que han de tomarse para la representación del tiempo frente a una función de la concentración sea una recta. Si los datos experimentales se distribuyen sobre una recta decimos que es satisfactoria de ecuación cinética seleccionada.

En el método diferencial ensayamos directamente el ajuste de la expresión cinética a los datos, sin integración alguna. Sin embargo, como esta expresión es diferencial, antes de intentar el procedimiento de ajuste hemos de calcular los valores de $(1/V)$ (dN/dt) a partir de los datos.

Cada uno de estos métodos presenta ventajas y desventajas específicas. El método integral es fácil de aplicar y está recomendado cuando se ensayan mecanismos específicos o expresiones cinéticas relativamente sencillas, o cuando los datos están tan dispersos que no pueden calcularse con suficiente exactitud las derivadas necesarias

para aplicar el método diferencial. El método diferencial es útil en casos más complicados, pero requiere más exactitud o mayor cantidad de datos.

Los datos directos obtenidos en experimentos en reactores de tipo Batch son usualmente de forma integrada. El modelo cinético o ecuación de velocidad se obtiene de los datos de C_A (concentración del componente A) en función de t (tiempo de saponificación), ya sea por ajuste de ecuaciones cinéticas integradas a los datos o por diferenciación de los datos directos de C_A en función a t (tiempo) para obtener datos de velocidad de reacción en función a la concentración. La diferencia se puede llevar a cabo en forma gráfica o analítica.

El método que será utilizado para determinar la cinética de saponificación es el método diferencial, debido a que es muy práctico y preciso para estos casos cuando la reacción y la integración son complejas y ofrece resultados más confiables ya que son datos reales de reacción.

1.9 Requerimientos de calidad del producto terminado

Con el fin de mantener un adecuado control en la producción de jabón, se requieren ciertos parámetros, dentro de los cuales se asegurará una calidad constante. Esto se podrá lograr mediante ciertos análisis a los que se deberá someter el producto para verificar su calidad. (Varón E., 2008)

De acuerdo a que no se logró encontrar información de la Norma Boliviana IBNORCA, con respecto a los requisitos para jabones líquidos, se presenta las normas ecuatorianas.

La norma técnica ecuatoriana INEN 850 -1982 -02. Establece los requisitos que debe cumplir el jabón líquido de tocador. En cuyo alcance esta norma se refiere al jabón líquido, para uso común, quedando excluidos los productos para usos particulares, tales como desinfectantes o medicinales.

Requisitos generales:

- El jabón líquido de tocador debe presentarse como una solución acuosa y homogénea.

- El olor debe ser agradable, en condiciones normales de uso y almacenamiento.
- No debe contener ingredientes en cantidades que sean tóxicas para los seres humanos.
- El jabón líquido de tocador debe producir espuma durante su uso.
- El producto debe estar libre de materias extrañas a su composición y fórmula declarada.
- El jabón líquido de tocador, mantenido a 5°C durante 24 h, no debe presentar sedimentación ni turbidez.
- El jabón líquido de tocador debe cumplir las especificaciones establecidas en la Tabla I-11

Tabla I-11: Especificaciones del jabón líquido de tocador

Requisito	Simples	Combinados	Método de ensayo
Materia insoluble en agua, % máx.	1,5	1,5	NTE INEN 816
Materia insoluble en alcohol		1,2	INEN 817
Alcalinidad libre (NaOH), % máx.	0,5	0,5	NTE INEN 821
Biodegradable del tensoactivo, % máx.	90	90	ASTM D2667
P ₂ O ₅ , % máx.	10	10	NTE INEN 830
Tensoactivos no jabonosos, %	-----	≤ 0,3	NTE INEN 833
Materia grasa total, % mín.	10	10	NTE INEN 823
pH máx.	11	11	NTE INEN-ISO 4316

Fuente: INEN 842-2015

CAPÍTULO II
PARTE EXPERIMENTAL

El presente Trabajo de Investigación aplicado ha sido desarrollado en las instalaciones del laboratorio de operaciones unitarias (LOU). Departamento de Procesos Industriales Biotecnológicos y Ambientales, perteneciente a la facultad de Ciencias y Tecnología, de la Universidad Autónoma “Juan Misael Saracho”.

2.1 Caracterización de la materia prima

En el departamento de Tarija, se dispone de diferentes tipos de café entre ellos: café tentación, ideal, criollito, negrito, etc. La Borra de café obtenida en la ciudad de Tarija, es la materia prima utilizada en el presente proyecto de investigación.

La materia prima que utilizamos en nuestro proceso, es café de la variedad Arábica, adquirida en diversas cafeteras que consumen café ideal, principalmente de las zonas céntricas, comerciales, etc. de la ciudad de Tarija.

Los granos de café ideal tienen una amplia experiencia y reconocimiento en el sector de la caficultora nacional. La práctica académica en el agro, el profundo conocimiento del mercado y una pasión por el mundo del café, apoyado con la experiencia de personal y tecnología en las máquinas logra una gran empresa basada en los conceptos de calidad.

La caracterización fisicoquímica de la materia prima se determinó mediante los análisis realizados en el laboratorio del Centro Análisis Investigaciones y Desarrollo CEANID - Tarija.

Los parámetros determinados de la borra de Café de variedad arábica proveniente de las Cafeterías perteneciente al municipio de Tarija ubicada en la provincia Cercado, fueron los siguientes:

- Determinación porcentual de Cenizas
- Determinación porcentual de Fibra
- Determinación porcentual de Grasa
- Determinación porcentual de Humedad
- Determinación porcentual de Densidad relativa
- Determinación porcentual de Proteínas totales

- Determinación porcentual de Hidratos de Carbono
- Determinación porcentual de Valor energético

Tabla II-1, muestra los resultados de la caracterización fisicoquímica de la materia prima que fueron realizados en el centro de Análisis, Investigación y Desarrollo, (ver Anexo A)

Tabla II-1: Informe de ensayo de la borra de café

Parámetros	Técnica y/o método de ensayo	Unidad	Resultado
Ceniza	NB 39034:10	%	0,58
Densidad	NB 230:99	g/ml	1,05
Fibra	Gravimétrico	%	5,43
Grasa	NB 313019:06	%	5,58
Hidratos de Carbono	Calculo	%	31,28
Humedad	NB 313010:05	%	57,13
Proteína Total	NB/ISO 8968-1:08	%	n. d.
Valor energético	Cálculo	Kcal/100 g	175,34
NB: Norma Boliviana		Kcal: Kilocalorías	n.d. No detectable
ISO: Organización Internacional de Normalización		g/ml: gramos por mililitros	%: porcentaje

Fuente: Centro de Análisis, investigación y Desarrollo “CEANID”, 2021

2.2 Descripción del método de investigación

2.2.1 Selección del método (proceso tecnológico) de obtención de aceite de la borra de café

Para la selección del método de obtención de aceite a partir de la borra de café, se considera los dos métodos mencionados en el capítulo anterior. 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 más adecuado.

Tabla II-2: Escala de calificación de Likert en el proceso de extracción de aceite

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

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla II-3, se muestra la ponderación definida según el peso que se consideró adecuado para cada factor evaluado. El factor se determina de acuerdo con las condiciones en las que el proyecto está siendo desarrollado. Una vez definida, la ponderación es independiente de las tecnologías a evaluar para un caso particular.

Tabla II-3: Valores de ponderación para la selección del método (proceso tecnológico) de obtención de aceite de la borra de café

Factor evaluado	Comentarios del evaluador	Calificación	
		Soxhlet	Prensado al frío
Aplicabilidad del proceso	Por las características del proyecto se desea que el proceso seleccionado pueda generar el mayor rendimiento en la extracción de aceite. La extracción por prensado es utilizada en pequeñas empresas especializadas. La extracción Soxhlet presenta buena eficacia, utilizada en pequeñas escalas, obteniéndose una mayor calidad de aceite.	4	1
Generación de subproductos con valor económico	La obtención del aceite de ambos procesos podría ser utilizado como elaboración de jabón líquido o sólido. Se considera que el aceite del proceso por Soxhlet es de mejor calidad que el del proceso por prensado, debido a que las partículas de la borra de café son de un tamaño minimizado, sin embargo, en el prensado estas se apelan dificultando la extracción.	5	2
Costos	Se requiere de tecnología que sea eficaz y eficiente en la obtención de aceite y jabón. Se considera que los materiales y equipos a utilizar en el proyecto, se encuentran fuera del alcance de laboratorio con lo que respecta al método de prensado, demostrándose que el costo de operación y mantenimiento por el mismo es mayor al costo del método por Soxhlet, ya que el mismo se cuenta en el LOU y con lo que respecta a los reactivos no es difícil su adquisición porque se encuentra en venta libre.	4	2
	Los reactivos a utilizar como solvente en la extracción de aceite, requieren de costos elevados, pero en algunos necesarios para una mejor extracción.	2	3
Operación	El método por Soxhlet puede extraer componentes solubles de sólidos con ayuda de un disolvente, utilizándose a escala laboratorio y no industrial resultando costoso el valor comercial de solventes, dejando residuo inherente en el aceite, teniendo que recurrir a un proceso de eliminación de trazas de solvente. En el prensado pueda dar un buen rendimiento, pero no satisfactoria en cuanto a calidad, presenta resistencia a la oxidación en estado bruto y menor resistencia a la oxidación una vez desodorizado, operación obligatoria a causa del olor a quemado	3	2
Complejibilidad del proceso	Se desea que la operación sea simple, flexible y confiable. Aunque el método de Soxhlet requiere de mucho tiempo de operar.	4	3
Entorno e impacto ambiental	En ambos procesos la Influencia de la temperatura no es un problema con este rubro pues las variaciones de temperatura permanecen en un intervalo adecuado para el funcionamiento de estos.	3	3

Fuente: Elaboración Propia, 2021

La tabla II-4, hace referencia a la calificación obtenida de dos tipos de extracción, representados en una matriz de decisión.

Tabla II-4: Matriz de decisión para el método (proceso tecnológico) de extracción de aceite de la borra de café

Selección del método experimental de extracción de aceite de la borra de Café.					
Factor evaluado	Valoración porcentual	Extracción Soxhlet		Extracción por prensa	
		Calif.	Pond.	Calif.	Pond.
Aplicabilidad del proceso	15%	4	0,6	1	0,15
Generación de subproductos con valor económico	20%	5	1	2	0,4
Costo de inversión inicial	30%	4	1,8	2	1,5
Costo de operación y mantenimiento		2		3	
Operación de proceso	20%	3	0,6	2	0,4
Complejidad de operación del proceso	10%	4	0,4	3	0,3
Entorno e impacto ambiental	5%	3	0,15	3	0,15
Total	100%		4,55		2,9

Fuente: Elaboración Propia, 2021

Según los resultados de la matriz de decisión, el método más recomendable a nivel laboratorio para la obtención de aceite de la borra de café utilizando solvente, es la extracción Soxhlet discontinua, por ser más eficaz a escala laboratorio, además de implicar bajos costos.

2.2.2 Selección del solvente utilizado en el proceso tecnológico de obtención de aceite de la borra de Café

En la Tabla II-5, se muestra la ponderación definida según el peso que se consideró para la selección del solvente más adecuado, utilizando el mismo método de calificación según la escala de Likert.

Tabla II-5: Selección del solvente para el proceso tecnológico de obtención de aceite de la borra de café

Factor Evaluado	Comentario del evaluador	Calificación		
		Hexano	Éter de Petróleo	Etanol
Selectividad y rendimiento	El hexano es el solvente orgánico que presenta mayor selectividad que otros, al igual que en rendimiento. Entre el etanol y el éter de petróleo la diferencia de rendimientos es mínima.	5	3	3
Facilidad de separación	El punto de ebullición del etanol es mayor que del hexano, teniendo el éter de petróleo el más bajo. Lo que influye directamente en la temperatura de destilación y, por lo tanto, en la facilidad de recuperación de los mismos.	4	5	3
Costos y disponibilidad	El hexano y el éter de petróleo son sustancias controladas, por tanto, de difícil acceso, siendo el precio del primero es el doble del segundo. En cambio, el etanol se puede comprar fácilmente y a bajo costo.	1	2	5
Riesgos para la salud	El NFPA 704 respecto a la salud del hexano y del etanol, es “1”. Es decir, son materiales que causan irritación, pero solo daños residuales menores aún en ausencia de tratamiento médico. En cambio, el éter de petróleo tiene “2”, es decir, que es un material bajo cuya exposición intensa o continua puede sufrirse incapacidad temporal o posibles daños permanentes a menos que se dé tratamiento médico rápido.	4	3	4
Cuidado del ambiente	Los tres solventes presentan similares riesgos de exposición, por eso, su calificación se asigna en base al porcentaje de recuperación de los mismos durante la destilación.	4	2	3
Inflamabilidad	Haciendo referencia al grado de inflamabilidad que se indica en el diamante de materiales peligrosos de cada solvente, el hexano y el etanol son de grado “3”, y el éter de petróleo, de grado “4”. Es decir, es un material que se vaporiza rápido o completamente a la temperatura a presión atmosférica ambiental, o que se dispersa y se quema fácilmente en el aire.	2	1	2

Fuente: Elaboración propia, 2021

La tabla II-6, hace referencia a la calificación obtenida de los tipos de solventes, representados en una matriz de decisión.

Tabla II-6: Matriz de decisión para el solvente utilizado en el proceso tecnológico de obtención de aceite de la borra de café

Selección del solvente para el proceso tecnológico de obtención de Aceite de la borra de Café							
Factor evaluado	Valoración porcentual %	Hexano		Éter de Petróleo		Etanol	
		Calif.	Pond.	Calif.	Pond.	Calif.	Pond.
Selectividad y rendimiento	30	5	30	3	18	3	18
Facilidad de separación	25	4	20	5	25	3	15
Costos y disponibilidad	25	1	5	2	10	5	25
Riesgos salud	10	4	8	3	6	4	8
Cuidado del ambiente	5	4	4	2	2	3	3
Inflamabilidad	5	2	2	1	1	2	2
TOTAL	100		69		62		71

Fuente: Elaboración propia, 2021

Una vez analizados los distintos factores considerados más importantes para la selección del solvente orgánico, utilizado en la extracción de aceite a partir de la borra de Café con equipo Soxhlet, se tienen los resultados de la matriz de decisión, los cuales señalan al Etanol como el más adecuado. Por ser selectivo, presentar bajos costos con un rendimiento relativamente bueno, tomando en cuenta además que, en este caso particular, se necesitará una cantidad elevada de solvente; entre otros aspectos importantes como los riesgos a la salud y el ambiente.

2.3 Diseño factorial del proceso tecnológico experimental

El diseño factorial es una estructura de investigación en la que se manipulan simultáneamente dos o más variables independientes o de tratamiento. Es decir, permite analizar los efectos principales y los de interacción de dichas variables o factores directamente en la variable respuesta.

2.3.1. Diseño factorial en la extracción de aceite de la borra de café

La etapa principal del proceso de obtención de aceite es la extracción con solvente, en este caso con equipo Soxhlet, la cual permite controlar variables tales como: temperatura de extracción, tiempo de extracción, relación soluto/solvente entre otras, que influyen en la velocidad de extracción y, por lo tanto, en el rendimiento de materia grasa (aceite de Borra de Café) en el producto final. Así, con el objetivo de obtener el mayor rendimiento de aceite.

Para determinar las variables significativas del presente trabajo de investigación, se plantea un diseño factorial con dos niveles y dos factores con dos repeticiones, por tanto, el número de tratamientos son 8, los factores a controlar son:

- Relación soluto/solvente: g de Borra de Café/ml de Etanol
- Tiempo de extracción

En la Tabla II-7, se presenta la codificación de las variables y/o factores del proceso de obtención de aceite de la borra de café mediante extracción por solvente.

Tabla II-7: Niveles de variación de los factores en el proceso de extracción de aceite

Variables	Niveles	
	Bajo	Alto
Relación soluto/solvente (g/ml)	A:(340/2000)	C:(380/2000)
Tiempo de extracción (horas)	4	6

Fuente: Elaboración propia, 2021

Tomando estos datos como punto de partida se realiza un diseño factorial 2².

$$N^{\circ} \text{ variables} = 2$$

$$\text{Niveles} = 2$$

$$N^{\circ} \text{ experimentos} = 2^2 = 4$$

Se realizará dos repeticiones.

$$N^{\circ} \text{ experimentos} = 4 * 2 = 8 \text{ experimentos}$$

Variable respuesta será la cantidad de aceite extraído

En la siguiente Tabla II-8, se muestra las variables en los niveles alto y bajo, un diseño experimental para ejecutar el proceso de extracción de aceite de la borra de café, en las instalaciones del laboratorio de operaciones unitarias de la UAJMS.

Tabla II-8: Matriz de diseño experimental en el proceso de extracción de aceite

N° Exp.	Factores		Respuesta I	Respuesta II
	Relación soluto/solvente	Tiempo de extracción (h)	Rendimiento (% Aceite B. Café)	Rendimiento (%Aceite B. Café)
1	A (340/2000)	4	R1	R1
2	B (380/2000)	4	R2	R2
3	A (340/2000)	6	R3	R3
4	B (380/2000)	6	R4	R4

Fuente: Elaboración propia, 2021

R: Variable respuesta a medir

2.3.2 Diseño Factorial en el proceso de Saponificación

La etapa principal en el proceso de saponificación, con equipo de Reactor Batch, involucra una metodología del diseño de experimentos investigando simultáneamente los efectos de todas las variables de interés a través de la realización de un número mínimo de experimentos, recurriendo en una mayor eficacia y en el ahorro de tiempos y costos.

Para el presente trabajo se realiza un diseño factorial completo de 2^k para determinar el número de experimentos elementales.

En la tabla II-9, muestran los niveles de variación de las variables del proceso de obtención de jabón líquido, también llamados factores.

Las variables o factores a controlar son 2, cada uno con 2 niveles. Para el cual se introdujeron los datos provenientes de los análisis correspondientes de laboratorio.

Tabla II-9: Niveles de variación de los factores en el proceso de saponificación

FACTORES	NIVEL	
Agitación rpm (nivel)	I	-
	II	+
% Exceso de KOH	10	-
	15	+

Fuente: Elaboración propia.

Factor A: % Exceso de KOH

Factor B: Agitación rpm

El número de experimentos a realizar son:

$$2^k$$

Donde:

Número de variables = 2

Niveles = 2

Nº experimentos = $2^2 = 4$

Se realizará dos repeticiones

Nº experimentos = $4 * 2 = 8$ experimentos

Variable respuesta será la cantidad de pasta jabonosa.

La agitación se realiza por medio de una batidora electrónica Oster, que cuenta con 5 velocidades. Por lo que se trabajará con los dos primeros niveles bajos de velocidad.

La agitación de la batidora electrónica para el proceso de saponificación se denominara como un nivel I y el nivel II.

Se requiere de 4 experimentos elementales cada una con su réplica en total serían 8 experimentos elementales, expresados en la Tabla II-10 y Tabla II-11.

Tabla II-10: Diseño Factorial del proceso de saponificación

N° de Experimentos	KOH %exc.	Agitación rpm
1	-	-
2	-	+
3	+	-
4	+	+

Fuente: Elaboración propia, 2021

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

La metodología de investigación científica a desarrollar estará basada según el texto elaborado por Tacillo (2016), este proyecto se regirá basado en un diseño de investigación experimental del orden cuasi experimento con un tipo de investigación de clasificación en investigación aplicada con un nivel de investigación de grado explicativo experimental.

De modo que nuestra metodología de investigación científica tomará dos variables independientes: concentración y agitación, con dos niveles de medición, para observar la variación de la variable dependiente la cual es la cantidad de pasta jabonosa, que dependerá de la manipulación, observación y comportamiento de las variables independientes durante todo el proceso de saponificación.

Donde otro factor importante para la elaboración de jabones líquidos es la temperatura donde debido a las circunstancias se trabajará a una temperatura constante en el transcurso del proceso de saponificación.

Tabla II-11: Matriz de diseño experimental en el proceso de saponificación

N° de Experimentos	Temperatura (°C)	KOH % exc.	Agitación rpm
1	80	10	I
2	80	10	II
3	80	15	I
4	80	15	II
5	80	10	I
6	80	10	II
7	80	15	I
8	80	15	II

Fuente: Elaboración propia, 2021

2.3.2.1 Variables a Medir

Se consideró medir y controlar la temperatura, el exceso de KOH y la agitación, por ello se procederá a desarrollar la incidencia, de estas tres variables en la reacción de saponificación la cual da lugar al origen de los jabones.

a) Temperatura

Es un requisito fundamental para cumplir con el método utilizado para la elaboración de jabones líquidos, el denominado proceso en caliente. Como menciona Guerrero (2014) esta variable, mínimamente, debe estar en 70°C, para cumplir con el proceso en caliente.

b) Exceso de KOH

Las recomendaciones que describe (Failor, 2001), en su libro guía para realizar jabones líquidos, sobre la importancia de usar un exceso de hidróxido de potasio es para saponificar aceites, con el fin de tener la certeza de que todos los ácidos grasos y ácidos grasos libres han sido neutralizados.

c) Agitación

La afirmación que hace García (2011), en el apartado de “condiciones de reacción”, sobre la importancia de la agitación en la etapa de saponificación resaltando el uso de batidoras o agitadores para acelerar el proceso, al considerar que sin una buena agitación los reactivos no formarán los productos esperados; respalda la decisión que se tomó al considerar a la agitación como una variable de estudio, por lo que en la

experimentación también se revelará la incidencia o no de esta variable en la formación de espuma que tengan los jabones.

2.3.3 Cálculo del análisis de varianza en el proceso tecnológico experimental

El análisis de la varianza (o ANOVA: *Analysis of variance*). Se refiere a un conjunto de situaciones experimentales y procedimientos estadísticos para el análisis de respuestas cuantitativas de unidades experimentales, donde el análisis de varianza se utiliza para comparar dos o más tratamientos, permitiendo contrastar la hipótesis nula de que las medias de k tratamientos ($k > 2$) son iguales, frente a la hipótesis alternativa de que por lo menos una de los tratamientos difiere de las demás en cuanto a su valor esperado. Este contraste es fundamental en el análisis de resultados experimentales, en los que interesa comparar los resultados de K 'tratamientos' o 'factores' con respecto a la variable dependiente o de interés.

La prueba de Anova tiene tres suposiciones: Existe distribución de normal en cada uno de los grupos (paramétrica), homogeneidad de varianzas en los grupos y los grupos son totalmente independientes unos de los otros.

Para el Anova se utilizan las hipótesis que son dos:

- a) La hipótesis nula “ H_0 ”:** en la cual indica que la media de todos los grupos es igual, ninguna de las variables tiene relación con la variable respuesta.
- b) La hipótesis alterna “ H_{alt} ”:** indicando que al menos una de la media es distinta y al menos un grupo de variables independientes tiene relación con la muestra variable dependiente.

La prueba del Anova se realiza con una suma de cuadrados, un promedio, calcular un parámetro conocido como “F” y comparar con un valor tabulado con el que se puede decidir si acepto o rechazo la hipótesis nula.

- Para obtener la suma de cuadrados debe de obtenerse la suma de:

La regresión $SC_R = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2$

Error $SC_E = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$

Total $S_{yy} = SC_T = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$

Donde \hat{y}_i corresponde a cada uno de los valores obtenidos a partir de la ecuación de la regresión lineal.

y_i , es cada valor de la variable dependiente. \bar{y} Es el promedio de los valores de la variable dependiente.

- Para obtener el promedio, se debe dividir las sumas de cuadrados entre los grados de libertad que les correspondan.

La regresión k $CM_R = \frac{SC_R}{k}$

Error n-k-1 $CM_E = \frac{SC_E}{n-k-1}$

Total n-1

Donde **n** es el número de muestras, **k** es el número de variables independientes.

- Para calcular la F, se debe obtener el promedio de los cuadrados de regresión entre el promedio de cuadrado medio del error

$$F_{cal} = \frac{CM_R}{CM_E}$$

- Concluyendo, se compara el F cal, donde si es mayor al F crítico (valor que ya esa en tablas), entonces se rechaza la hipótesis nula, en caso contrario esta es aceptada.

Tabla II-12: Análisis de Varianza (ANOVA)

	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F
Regresión	k	$SC_R = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2$	$CM_R = \frac{SC_R}{k}$	$F_{cal} = \frac{CM_R}{CM_E}$
Error	n-k-1	$SC_E = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$	$CM_E = \frac{SC_E}{n - k - 1}$	
Total	n-1	$S_{yy} = SC_T = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$		

Fuente: López E., 2019.

2.4 Procedimientos y técnicas empleados para la obtención de los resultados

El presente proyecto de investigación se realizó en las instalaciones del Laboratorio de Operaciones Unitarias, del Departamento de Proceso Industriales y Biotecnológicos de la Facultad de Ciencias y Tecnología de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

2.4.1 Materiales de laboratorio, equipos, utensilios e insumos utilizados para obtener jabón líquido de aceite de borra de café

2.4.1.1 Materiales de laboratorio

En la Tabla II-13 se detallan los materiales de laboratorio utilizados en la parte experimental para obtener jabón líquido a partir de la extracción de aceite de la borra de café.

Tabla II-13 Materiales en el proceso de Extracción de aceite

Materiales	Especificación	Calidad	Cantidad
Extractor Soxhlet	7 500 ml	Acero inoxidable	1
Refrigerante	grande	Vidrio	1
Manguera	-	PVC	2
Recipiente metálico	3 000 ml	Acero inoxidable	1
Bandeja	5 kg	PVC	1
Soporte universal	-	Acero inoxidable	1
Pinza doble nuez	-	Acero inoxidable	1
Vaso de precipitación	1 000 ml, 600ml, 400 ml	Vidrio	3
Papel filtro	Pliegue	Papel	15
Papel aluminio	Rollo (7,5 m x 30 cm)	Aluminio	2
Espátula	pequeña	Acero inoxidable	1
Frasco de Vidrio	200 ml	Vidrio	8
Malla de amianto	pequeña		1
Probeta	100 ml, 1000 ml	PVC, Vidrio	2
Pipeta	10 ml	Vidrio	1
Termómetro de mercurio	(0-100) °C	Vidrio	1
Vidrio de reloj	Pequeño	Vidrio	1
Papel tornasol	-	Papel	1

Fuente: Elaboración propia, 2021

2.4.1.2 Equipos utilizados en el proceso de obtención de jabón líquido a partir de la extracción de aceite de la borra de café

La Tabla II-14, se detallan los equipos utilizados en la parte experimental para obtener jabón líquido, para un mayor detalle mirar Anexo C.

Tabla II-14: Equipos utilizados en el proceso de obtención de jabón líquido a partir de la extracción de aceite de la borra de café

Equipo	Marca	Fuente de energía	Descripción
Estufa de secado	Conterm	Eléctrica	Equipo utilizado para secar las muestras de borra de café
Analizador de Humedad Electrónica	Sartorius, MA 100/MA 50	Eléctrica	Equipo que tiene la finalidad de determinar la humedad de la masa pesada húmeda trans un proceso de secado
Molino de bolas	ML 001 (LOU)	Eléctrica	Equipo utilizado para reducir las partículas de la borra de café, para un mejor contacto del solvente con el soluto.
Extractor Soxhlet	-	Eléctrica	Es un equipo compuesto por: refrigerante, balón, calentador, extractor, termómetro y mangueras. Utilizado para la extracción del aceite presente en la borra de café.
Calentador Eléctrico	Heizen	Eléctrica	Equipo utilizado para calentar los recipientes con líquidos presente en el balón
Balanza Electrónica	Practimolds SF-400	Digital	Utilizado para el pesaje de aceite, insumos en la obtención de jabón líquido
Balanza Analítica	Gibertini	Eléctrica	Equipo utilizado para el pesaje exacto en el proceso de extracción de aceite.
Agitador mecánico (Batidora)	Oster	Eléctrica	Utilizado para agitar la muestra en el proceso saponificación
Baño María	-	Eléctrica	El equipo se utilizó para incubar las muestras de aceite y la solución de KOH, permitiendo que la temperatura del agua sea constante durante el periodo de tiempo.
Reactor Bath	-	Eléctrica	Equipo adecuado, encargándose de la etapa de saponificación

Fuente: Elaboración propia, 2021

2.4.1.3 Utensilios e insumos utilizados en proceso de obtención de jabón líquido

En la tabla II-15, se detallan los utensilios utilizados en la parte experimental para obtener de jabón líquido a partir de la extracción de aceite de la borra de café.

Tabla II-15: Utensilios utilizados en el proceso de obtención de jabón líquido a partir de la extracción de aceite de la borra de café

Utensilios	Capacidad	Calidad	Cantidad
Fuentes	5 kg	Plástico	2
Jarra graduada	1000 ml	Plástico	1
Repasadores	mediano	Algodón	2
Espátula	mediana	acero inoxidable	1
Brocha	1 1/2"	Madera	1
Bolsas de polietileno	500 gr	PVC	30
Engrampadora	grandes	Acero inoxidable	1

Fuente: Elaboración propia, 2021

En la tabla II-16, se detallan los insumos utilizados en la parte experimental para obtener jabón líquido a partir de la extracción de aceite de la borra de café.

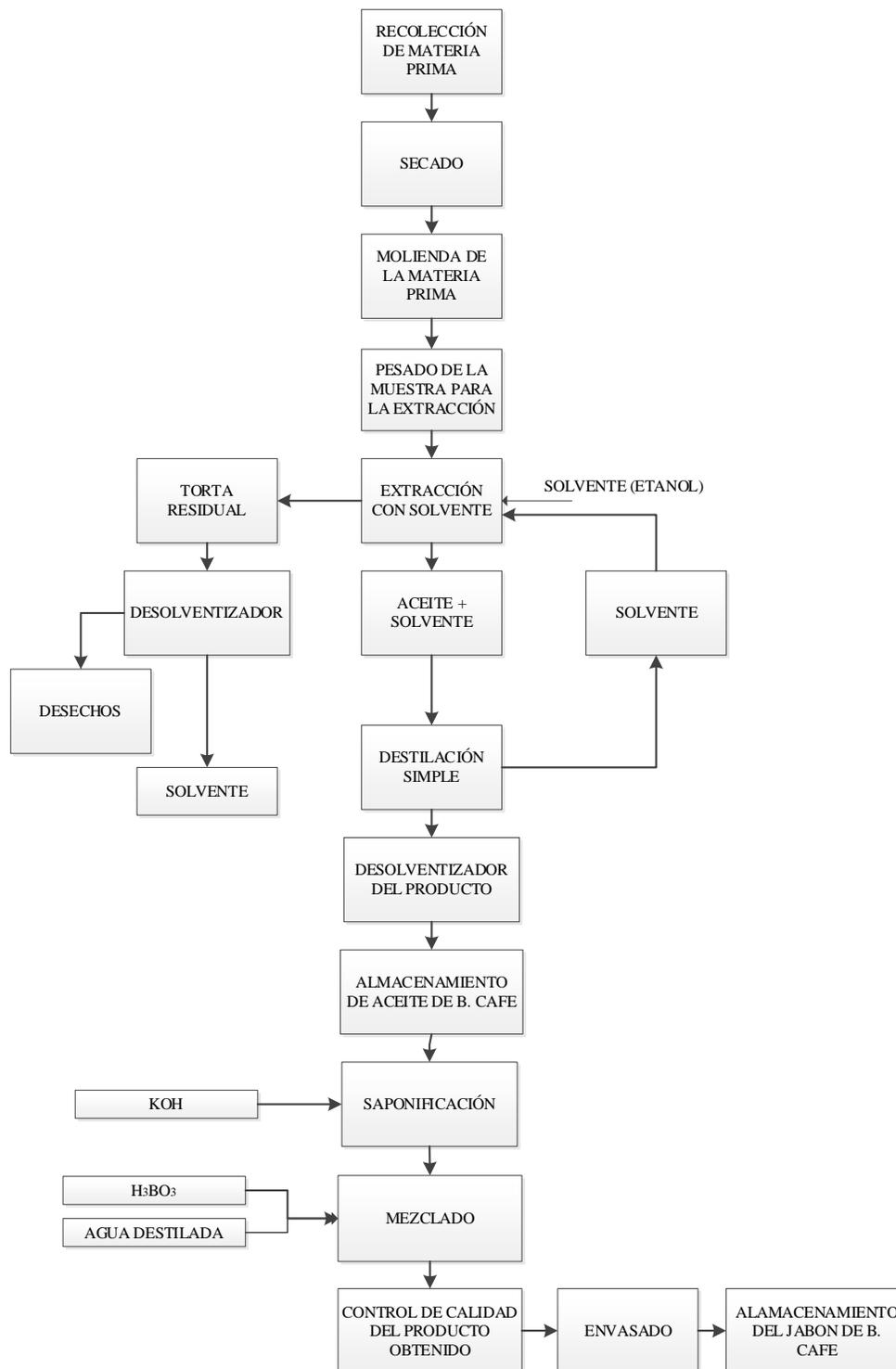
Tabla II-16: Insumos utilizados en el proceso de obtención de jabón líquido a partir de la extracción de aceite de la borra de café

Insumos	Estado	Procedencia	Marca
Etanol 96%	Líquido	Bolivia	-
Agua destilada	Líquido	Bolivia	SOLQUIFAR
Ácido Bórico	Sólido	Bolivia	SOLQUIFAR
Hidróxido de potasio	Sólido	Argentina	AEB ANDINA S.A.

Fuente: Elaboración propia, 2021

2.4.2 Proceso para la obtención de jabón líquido a partir de la extracción de aceite de la borra de café

En la figura 2-1, se muestra el diagrama de flujo para obtener jabón líquido a partir de la extracción de aceite de la borra de café.



Fuente: Elaboración propia, 2021
Figura 2-1 Diagrama de bloques del proceso de obtención de jabón líquido a partir de la extracción de aceite de la borra de café

2.4.3 Descripción del proceso para obtener jabón líquido a partir de la extracción de aceite de la borra de café

Las operaciones involucradas para obtener jabón líquido a partir de la extracción de aceite de borra de café, se describen a continuación:

2.4.3.1 Recolección de la Materia Prima

La materia prima utilizada en la parte experimental, está constituida por la Borra de Café IDEAL, adquirida de las cafeterías de la ciudad de Tarija. Donde el Café proviene de la industria Molinera de Café “ideal” ubicada en la ciudad de Santa Cruz de la Sierra el cual se dedica a la producción de café tostado y/o molido 100% boliviano, de variedad Arábica, cultivado en la región de Los Yungas.

La borra de café se recolectó durante 1 semana, dos días después de su utilización, con un promedio total de 10 kg de borra de café húmeda, la misma para evitar formación de mohos para un posterior secado (ver figura 2-2)



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 2-2 Recolección de la borra de café

2.4.3.2 Secado de la Materia Prima

La borra de café inicialmente contiene una humedad entre 65 – 70%, la cual se disminuye mediante un proceso de secado. Este proceso es muy importante para el almacenamiento de la borra de café. Previamente se realizó un secado al sol, en patios de concreto, las mismas fueron cubiertas con el fin de evitar contaminación con otras partículas y formación de mohos, hasta disminuir la humedad de la borra a 56%. Este

proceso evita la descomposición de la borra de café debido al crecimiento de hongos en la superficie. Posterior se terminó secando en la Estufa Conterm que se encuentra en los ambientes del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la UAJMS.

El secado en la Estufa Conterm, se introdujeron 800gr en una bandeja por un tiempo de 3 horas a una temperatura de 105°C -130° C. donde la pérdida de humedad fue del 49%. Procediendo a secar el resto de la borra semihúmeda almacenada.



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 2-3 Secado de la Borra de Café en la Estufa Conterm

Se determinó el contenido de humedad de la borra de café mediante un analizador de humedad electrónica. La prueba consiste en colocar 10 g de borra de café en un platillo, seleccionar el modelo de resultado. El cual realiza un trabajo hasta los 105°C, con una legibilidad de 1 mg/0,1mg, 0,01%/0.001% Humedad (ver figura 2-4).

La finalidad de secado hasta una humedad menor al 5% es facilitar la penetración del solvente posteriormente en el proceso de extracción.



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 2-4 Analizador de humedad electrónica de la borra de café

2.4.3.3 Molido de la materia prima

La borra de café una vez secada pasa por un proceso de molienda el cual se utilizó un molino de bolas durante un tiempo de 50 minutos, con total de 42 bolas. Reduciendo así el tamaño de las partículas de la borra de café, con el fin de aumentar el rendimiento de extracción del aceite de la borra de café (ver figura 2-5).



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 2-5 Molido de la borra de café en seco en molino de bolas

2.4.3.4 Extracción Soxhlet

Se realizó la extracción en un equipo basado al funcionamiento de un Extractor Soxhlet. Aplicándose como solvente el Alcohol Etilico al 96%. La muestra de borra molida es pesada según la cantidad tomada en cuenta en la relación soluto/solvente del diseño factorial planteado, la misma es introducida a un sobre hechizo de papel filtro el cual

es sellado para un cierre que no permita la salida de pequeñas partículas. El cual es incrustado al extractor. Se agrega el solvente en el balón (recipiente metálico), se monta todo el equipo extractor de Soxhlet, para una vez iniciar con el calentamiento del solvente y recircular agua por el refrigerante. La temperatura fue levemente inferior al punto de ebullición del solvente (80°C) trabajándose así en 72.3°C durante un periodo que se considera en el diseño factorial (4 horas y 6 horas). Terminado el tiempo del proceso de extracción el aceite contenido en la borra de café se solubiliza en el Etanol, obteniéndose una mezcla de aceite de la borra de café y el solvente.



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 2-6 Extracción de aceite de la borra de café

2.4.3.5 Destilación Simple

La realización de una destilación simple se realiza en el mismo extractor, donde al inicio se retira el sobre de papel filtro contenido de borra de café humedecido por alcohol etílico. El extractor debe de encontrarse vacío, por lo que la mezcla de aceite

de la borra de café y el solvente debe de estar en el balón. Posterior del montaje del equipo se coloca una malla de amianto sobre el calentador con el fin de repartir la temperatura de manera uniforme sobre el balón y se dé inicio con la destilación. El tiempo de destilación es de 2 horas, obteniéndose el aceite en el balón y se recupera la mayor parte de solvente en el extractor.



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 2-7 Destilación simple, recuperación del solvente y obtención de aceite

2.4.3.6. Descarte del solvente en el aceite de borra de café

Concluyendo el periodo de destilación, se realiza una descarte del solvente en el producto obtenido, con el objetivo de eliminar las trazas de etanol presentes en el aceite de la borra de café, la misma es llevada a la estufa durante 1 hora previo a un calentamiento por un tiempo de 30 minutos para alcanzar el punto de ebullición del solvente, asegurando así la volatilización completa del etanol (ver figura 2-8).



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 2-8 Eliminación del solvente presente en el aceite de la borra de café

2.4.3.7. Almacenamiento del Aceite de Borra de Café

El aceite de la borra de café es almacenado en pequeños frascos de vidrio, cerrados herméticamente y cubiertos con papel de aluminio, evitando la exposición a la luz solar (ver figura 2-9).



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 2-9 Aceite de borra de café libre de solvente

2.4.3.8 Descarte del solvente de la borra de café húmeda

La borra de café luego de ser sometida a extracción aun contiene alcohol etílico, que puede ser fácilmente extraído en una estufa descartando así el solvente. Donde el cartucho de papel filtro contenido de borra de café húmeda es trasladada a una estufa durante 7 horas (previo calentamiento de 30 minutos para alcanzar el punto de

ebullición del solvente). Con el objetivo de eliminar por completo el etanol presente en la borra de café (ver figura 2-10).



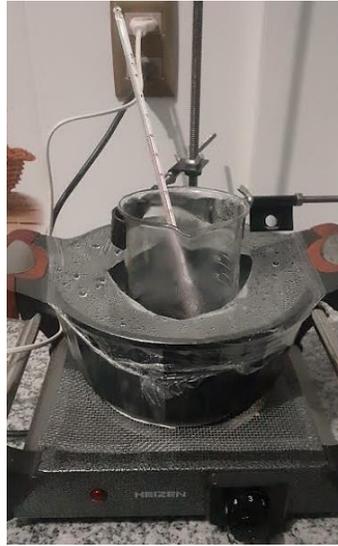
Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 2-10 Borra de Café seca libre de presencia de Etanol

La borra luego de haber sido procesada contiene azúcares, polisacáridos y minerales, que le confieren un alto valor biotecnológico, que puede ser aprovechado en procesos fermentativos, y también puede utilizarse como combustible sólido aplicando calcinación o como fertilizante para las plantas, con el fin de eliminar residuos sólidos sin ser aprovechados al máximo.

2.4.3.9 Saponificación

REACTOR: Se monta un baño maría con un medidor de temperatura en el cual se introduce un vaso de precipitación suspendido, para que tenga total contacto con el agua del baño maría (ver figura 2-11).



Fuente: Elaboración propia, 2021
Figura 2-11 Reactor montado para el proceso de saponificación

a) Calentamiento del aceite

En el reactor montado, se introduce el aceite de borra de café previamente filtrado a calentar hasta que llegue a los 60-80 °C. cuando el aceite haya alcanzado la temperatura indicada, se prepara la lejía (ver figura 2-12).



Fuente: Elaboración propia, 2021
Figura 2-12 Proceso de filtrado y calentamiento del aceite de la borra de café

b) Preparación de la solución de KOH

Se debe disponer de un vaso de precipitado exclusivo para la disolución del hidróxido de potasio en agua; (se calculan las cantidades con relación a la cantidad de aceite a saponificar). Se pesaron las cantidades de hidróxido de potasio según el experimento, donde el primero en ser vertido al vaso de precipitado es el agua y posterior el hidróxido de potasio, mezclándose hasta conseguir una solución homogénea; puesto de que se trata de una reacción exotérmica y fuertemente alcalina (ver figura 2-13).



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 2-13 Preparación de la solución de hidróxido de potasio

c) Saponificación

Se verifica que el aceite y la solución de KOH (lejía) se encuentren a la misma temperatura, al momento de iniciar esta reacción el vaso de precipitado que actúa como reactor debe estar fuera del baño maría. Procediéndose a verter con cuidado y lentamente la lejía a los aceites para posterior ser mezclada con ayuda de un agitador, hasta conseguir una traza cremosa. Posterior se introduce el reactor al baño maría (ver figura 2-14).



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 2-14 Reacción del aceite y la solución de KOH, traza cremosa

d) Cocción

Para disipar las pérdidas de calor, se cubrió totalmente el vaso de precipitado con papel film, se dispuso al interior un termómetro para controlar la temperatura de la pasta jabonosa, la cual debe virar de un color marrón claro a un tono ámbar translúcido, lo cual es una señal de neutralización de los ácidos grasos, se procedió a revolver la pasta jabonosa cada 15 minutos. Pasado el tiempo se examina si el jabón está homogéneo o se ha cortado. Si está cortado, se agrega 1-2 ml de alcohol, se remueve por unos minutos, activando la saponificación y así llegar a la traza. Se verifica que rápidamente pasa de un natilla a una pasta espesa (ver figura 2-15).



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 2-15 Proceso de cocción de la pasta jabonosa

Se tapa el jabón y se cocina por 20 minutos. No debe ser destapado a cada rato porque evaporará demasiado su agua.

Se cocina el jabón por dos o tres espacios de 20 minutos, removiendo bien cada 20 minutos para que todo se cocine de forma pareja y hasta que perciba que se torna gelificado, presentando una transparencia en la pasta y estará lista (ver figura 2-16).



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 2-16 Pasta jabonosa de aceite de borra de café

Prueba de ácidos grasos: alrededor de las 4 horas y media de cocción, se procede a recoger unos gramos de pasta jabonosa y diluir en agua destilada, se debe llegar a evidenciar la transparencia de esta dilución, si la mezcla presenta turbidez la pasta jabonosa debe seguir cociendo en el baño maría; por el contrario, si se evidencia que la dilución es clara y translúcida a la luz, significa que los ácidos grasos fueron neutralizados, por ende la pasta jabonosa está lista para la siguiente etapa (ver figura 2-17).



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 2-17 Prueba de saponificación y prueba de espuma

e) Etapa de mezclado

En esta etapa se adicionó a la pasta jabonosa el agua destilada (caliente pero no hirviendo) al reactor, mezclándose con la ayuda de la espátula. Dejándose en cocción un poco más de tiempo, removiendo hasta disolver (ver figura 2-18).



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 2-18 Mezcla de la pasta jabonosa con agua destilada

Por último, se realiza una solución de ácido bórico de uso medicinal que tiene un 100% de pureza, este se introduce para neutralizar el excedente de álcali, el cual fue a una molaridad de 8,37 M. Para que se integre bien la solución neutralizante hay que agregarla bien caliente y evitar que no forme una nube de jabón duro.

Una vez incorporado el ácido bórico a la pasta jabonosa, se verifica el pH el cual no debe exceder el límite de 11.

Una vez alcanzada la fluidez deseada, el vaso de precipitado que contiene el jabón guardará reposo 24 horas para observar si existe turbidez en el jabón, posteriormente se procede a envasar dichos jabones (ver figura 2-19).



Fuente: Elaboración propia, 2021
Figura 2-19 Envasado de jabón líquido

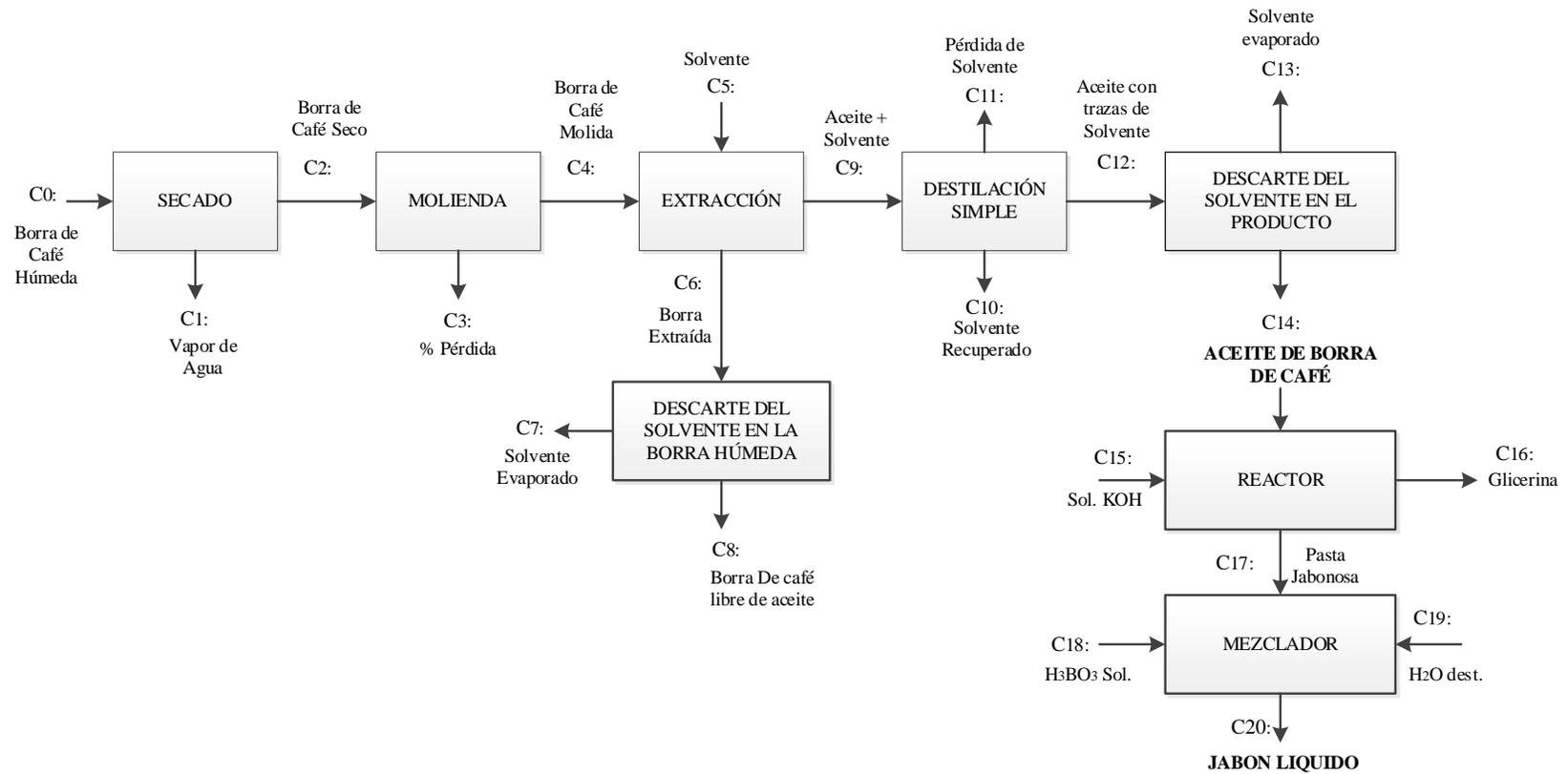
El jabón líquido fue envasado a una temperatura menor a los 40 °C, evitando deformación por dilatación en los envases de plástico, donde en el transcurso de tiempo de enfriamiento el jabón es removido cada 30 minutos evitando el levantamiento de espuma, presentando un jabón líquido con una consistencia viscosa. (ver figura 2-20).



Fuente: Elaboración propia, 2021
Figura 2-20 Jabón líquido a partir del aceite de borra de café

2.4.4 Balance de materia del proceso tecnológico experimental de obtención de jabón líquido a partir de la extracción de aceite de la borra de café

Con el objetivo de brindar mayor información de cada etapa del proceso y su relación con las demás (ver Figura 2-21), se detalla un diagrama de bloques del proceso tecnológico experimental de la obtención de jabón líquido a partir de la extracción de aceite de la borra de café.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-21 Diagrama de bloques de la obtención de jabón líquido a partir de la extracción de aceite de la borra de café

Tabla II-17: Representación de corrientes del proceso tecnológico para la extracción del aceite de la borra de café

Corriente	Contenido	Descripción	Proceso asociado como: salida	Proceso asociado como: entrada
C ₀	Materia prima	Corriente de Borra de Café húmeda.		Secado
C ₁	Vapor de Agua	Corriente de vapor de agua desprendida de la Borra de Café, a través del proceso de Secado.	Secado	
C ₂	Materia prima Seca	Corriente de entrada de Borra de Café Seco.	Secado	Molienda
C ₃	% Perdida	Corriente de pérdida de Borra en molienda.	Molienda	
C ₄	Borra de Café Molida	Corriente de la Borra de Café molida.	Molienda	Extracción
C ₅	Solvente	Corriente de solvente (Etanol 96%).		Extracción
C ₆	Borra de Café Extraída	Corriente de Borra de Café Húmeda con contenido de solvente + trazas de aceite.	Extracción	Descarte del solvente en la borra húmeda
C ₇	Solvente evaporado	Corriente de Etanol evaporado durante la etapa de descarte de solvente en la Borra húmeda.	Descarte del solvente en la borra húmeda	
C ₈	Borra de Café libre de Aceite	Corriente de Borra de Café seco libre de solvente, Sub producto para fertilizantes de plantas.	Descarte del solvente en la borra húmeda	
C ₉	Aceite + Solvente	Corriente de una mezcla de Aceite y Etanol, depositada en el balón.	Extracción	Destilación Simple

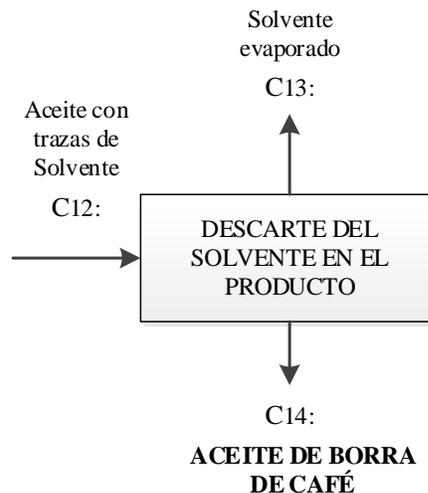
C ₁₀	Solvente Recuperado	Corriente de Recuperación del solvente (75% aprox.), en el proceso de Destilación Simple. Proceso basado a la diferencia de punto de ebullición.	Destilación Simple	
C ₁₁	Perdida de Solvente	Corriente de Perdida de Solvente, producido en el proceso de Destilación Simple.	Destilación Simple	
C ₁₂	Aceite con trazas de Solvente	Corriente de Aceite con cantidades mínimas de Solvente	Destilación Simple	Descarte del solvente en el Producto
C ₁₃	Solvente Evaporado	Corriente de las Trazas de solvente evaporado presente en el aceite.	Descarte del solvente en el Producto	
C ₁₄	Aceite de Borra de Café	Corriente del producto, Aceite de la Borra de Café Ideal.	Descarte del solvente en el Producto	
C ₁₅	Solución de Hidróxido de potasio	Corriente en solución de hidróxido de potasio en agua destilada		Reactor
C ₁₆	Glicerina	Corriente de glicerina formada en la reacción de saponificación	Reactor	
C ₁₇	Pasta Jabonosa	Corriente de pasta Jabonosa de aceite más solución de KOH producido en un proceso de cocción	Reactor	Mezclador
C ₁₈	Solución de ácido Bórico	Corriente de solución de ácido bórico para neutralizar el exceso de álcali presente en la pasta jabonosa		Mezclador
C ₁₉	Agua destilada	Corriente de agua destilada, para diluir la pasta jabonosa		Mezclador
C ₂₀	Jabón liquido	Corriente de jabón liquido	Mezclador	

Fuente: Elaboración Propia, 2021

El balance materia comúnmente suele realizarse de inicio a final, pero acuerdo a lo planteado en el diseño de experimentos en este proyecto, el balance de materia se realizó de final a inicio debido a que la relación soluto/solvente ya estaba diseñada desde la entrada al proceso de extracción Soxhlet y no así desde el secado y molino. Siendo la relación soluto/solvente y tiempo de extracción, las variables más significativas en la extracción de aceite Donde la incógnita es cuánto de borra húmeda se necesita para alcanzar dicha cantidad de aceite obtenida, tomándose en cuenta los datos experimentales de pérdida de humedad y pérdidas en el molino.

2.4.4.1 Balance de materia en la etapa de descarte del solvente en el producto

La figura 2-22, muestra el balance de materia en la etapa de eliminación de las trazas de solvente que aún persisten en 35,098 g de mezcla (aceite + solvente). En esta etapa el aceite obtenido fue de 33,677 gr, datos que fueron tomados en la parte experimental del trabajo.



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 2-22 Etapa de descarte del solvente en el aceite

Balance de materia global en la etapa de descarte del solvente en el aceite:

$$C_{12} = C_{13} + C_{14}$$

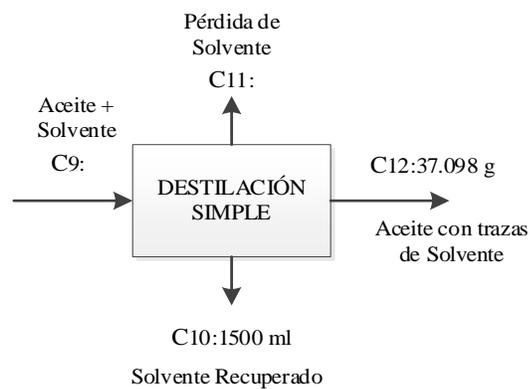
$$C_{13} = C_{12} - C_{14}$$

$$C_{13} = 37,098 \text{ gr} - 35,677 \text{ gr}$$

$$C_{13} = 1,421 \text{ gr solvente evaporado}$$

2.4.4.2 Balance de materia del proceso de destilación simple

La figura 2-23, muestra el balance de materia en la etapa de destilación simple, obteniéndose una recuperación de solvente de 1500 ml, aceite con trazas de solvente de 37,098 gr. Requiriéndose encontrar la cantidad de la mezcla de aceite con solvente y así también la pérdida de solvente que se ha evaporado o escapado durante el tiempo de destilación.



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 2-23 Etapa de la destilación simple

Tomándose en cuenta la densidad del etanol es: 0.812 kg/l

$$\text{Por tanto: } \rho = \frac{m}{V}$$

$$m = \rho * V$$

$$m = 0,812 \frac{\text{kg}}{\text{l}} * 1.5 \text{ l}$$

$$m = 1,218 \text{ kg} = 1218 \text{ gr}$$

$$C_{10} = 1218 \text{ gr de etanol recuperado}$$

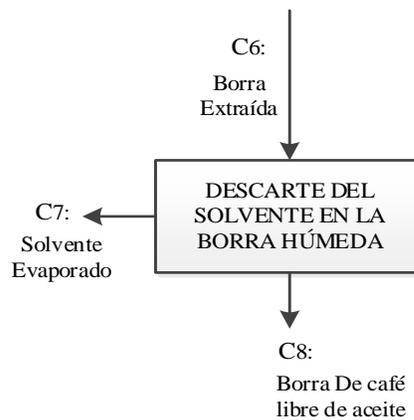
Balance de materia general en la etapa de destilación simple:

$$C_9 = C_{10} + C_{11} + C_{12}$$

$$C_9 = 1218 \text{ gr} + C_{11} + 37,098 \text{ gr} \dots \dots \dots (\text{Ec.1})$$

2.4.4.3 Balance de materia del proceso de descarte del solvente en la borra de café extraída

La figura 2-24, muestra el balance de materia en la etapa de descarte del solvente en la borra de café húmeda extraída en el cartucho hechizo de papel filtro, cuya finalidad es dar a evaporar el resto de solvente penetrado en el mismo con un peso de 723,64 gr y reutilizar la borra de café como fines a la agronomía.



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 2-24 Etapa de descarte del solvente en la borra de café húmedo

Balance de materia general en la etapa de descarte del solvente de café húmeda.

$$C_6 = C_7 + C_8$$

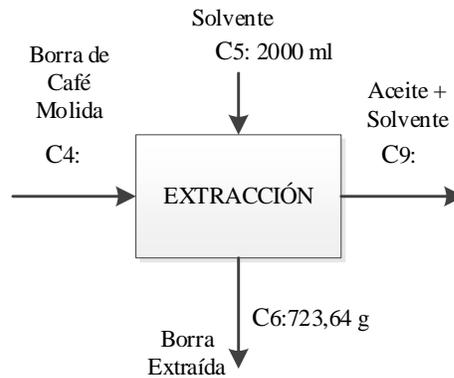
$$C_7 = C_6 - C_8$$

$$C_7 = 723,64 \text{ gr} - 379,847 \text{ gr}$$

$$C_7 = 343,793 \text{ gr de solvente evaporado} = 47,51\%$$

2.4.4.4 Balance de materia de la etapa de extracción de aceite de la borra de café

La figura 2-25, muestra el balance de materia en la etapa de extracción de aceite, introduciéndose al extractor la borra de café seco 380 gr y 2000 ml de solvente.



Fuente: Elaboración propia, 2021
Figura 2-25 Etapa de extracción de aceite

Tomándose en cuenta la densidad del etanol es: 0,812 kg/l

Por tanto:

$$m = 0,812 \frac{kg}{l} * 2 l$$

$$m = 1,624 kg = 1624 gr$$

$$C_5 = 1624 gr \text{ de solvente}$$

Balance de materia general en la etapa de extracción de aceite de la borra de café.

$$C_4 + C_5 = C_6 + C_9$$

$$C_9 = C_4 + C_5 - C_6$$

$$C_9 = 380 gr + 1624 gr - 723.640 gr$$

$$C_9 = 1280,360 gr \text{ de aceite con solvente}$$

Reemplazando la C_9 en la ecuación 1:

$$C_9 = 1218 gr + C_{11} + 37,098 gr$$

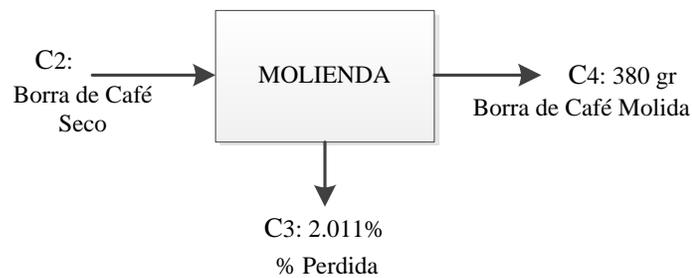
$$1280,360 gr = 1218 gr + C_{11} + 37,098 gr$$

$$C_{11} = 1280,360 gr - 1218 gr - 37,098 gr$$

$C_{11} = 25,262 \text{ gr}$ de pérdida de solvente en la destilación simple

2.4.4.5 Balance de materia en la etapa de molienda de la borra de café

La figura 2-26, muestra el balance de materia en la etapa de molienda de la borra de café seco. En la etapa se recolecta 380 gr para ser utilizados en la extracción, calculándose una pérdida de 2,0011% (dato determinado en una balanza digital y analítica), Requiriéndose calcular la cantidad de borra seca que se necesita moler para recolectar 380 gr de borra de café.



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 2-26 Etapa de molienda de la borra de café seca

Balance de materia general en la etapa de molienda de la borra de café.

$$C_2 = C_3 + C_4$$

$$C_2 = C_3 + 380 \text{ gr}$$

$$C_2 = (C_2 * (\frac{2,011\%}{100})) + 380 \text{ gr}$$

$$C_2 = (C_2 * 0,020) + 380 \text{ gr}$$

$$C_2 - C_2 * 0,020 = 380 \text{ gr}$$

$$C_2(1 - 0,020) = 380 \text{ gr}$$

$$C_2 = \frac{380 \text{ gr}}{(1 - 0,020)}$$

$$C_2 = 387,798 \text{ gr de borra de cafe seco}$$

Balance parcial de la fracción de la pérdida de borra de café seco para determinar la pérdida en la etapa de molienda:

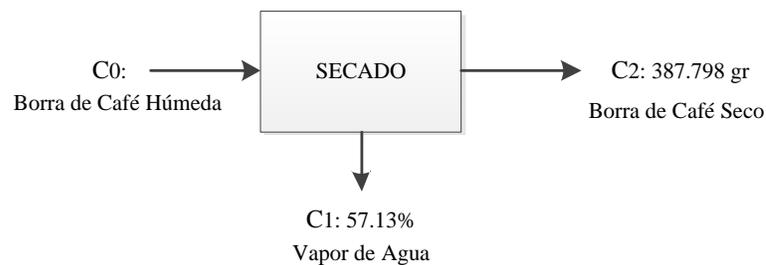
$$C_3 = C_2 * 0,020$$

$$C_3 = 387,798 \text{ gr} * 0,020$$

$$C_3 = 7,798 \text{ gr de pérdida de borra de café seco}$$

2.4.4.6 Balance de materia de la etapa de secado de la borra de café húmeda

La borra de café húmedo es necesario ser secado en el tiempo menos posible después de su recolección o uso ya que el mismo empieza a presentar mohos. La figura 2-27, muestra el balance de materia en la etapa de secado de la borra de café húmeda. Presentando una vaporización de agua del 57,13 %, dato que se calculó en el analizador de humedad electrónica



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 2-27 Etapa de secado de la borra de café húmeda

Balance de materia general en la etapa de secado de la borra de café húmeda.

$$C_0 = C_1 + C_2$$

$$C_0 = C_1 + 387,798 \text{ gr}$$

Balance parcial de la relación de la corriente de borra de café húmedo con el porcentaje de pérdida de vapor de agua, para determinar la cantidad de ingreso de borra de café húmedo.

$$C_0 = (C_0 * (\frac{57,13\%}{100})) + 387,798 \text{ gr}$$

$$C_0 = (C_0 * 0,571) + 387,798 \text{ gr}$$

$$C_0 - C_0 * 0,571 = 387,798 \text{ gr}$$

$$C_0(1 - 0,571) = 387,798 \text{ gr}$$

$$C_0 = \frac{387,798 \text{ gr}}{(1 - 0,571)}$$

$$C_0 = 904,590 \text{ gr de borra de café húmedo}$$

Balance parcial de la cantidad de vapor de agua evaporados en el proceso de secado

$$C_1 = C_0 * 0,571$$

$$C_1 = 904,590 * 0,571$$

$$C_1 = 516,792 \text{ gr de vapor de agua evaporados}$$

2.4.4.7 Rendimiento de la extracción de aceite de la borra de café

Dando a concluir que se necesitan 904,590 gramos de borra de café húmeda para obtener 33,677 gr de aceite de borra de café dando un rendimiento de:

$$\text{Rendimiento de extracción} = \frac{\text{Cantidad de Aceite}}{\text{Cantidad de Borra Seca}} * 100$$

$$\eta = \frac{35,677 \text{ gr}}{380 \text{ gr}} * 100$$

$$\eta = 9.38 \%$$

2.4.4.8 Resumen general de balance de materia en el proceso de extracción de aceite

En la tabla II-18, se resume el balance de materia en el proceso de extracción de aceite de borra de café, presentando las corrientes de entrada y salida en cada proceso hasta

la obtención del aceite, donde el contenido de las corrientes se describe en la tabla II-17.

Tabla II-18: Resumen de balance de materia en el proceso de extracción de aceite de la borra de café

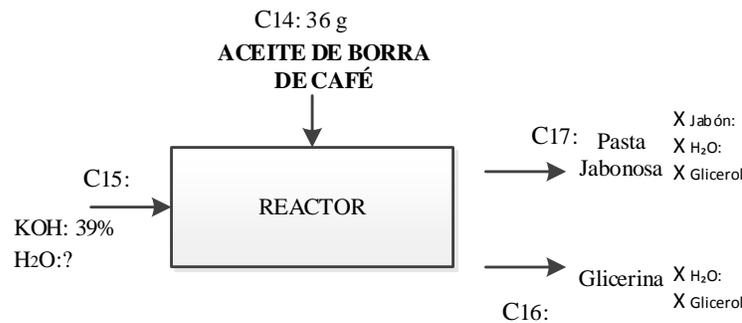
Proceso	Entrada		Salida	
	Corriente	Cantidad (g)	Corriente	Cantidad (g)
Secado	C ₀	904,59	C ₁	516,792
			C ₂	387,798
Molienda	C ₂	387,798	C ₃	7,798
			C ₄	380
Extracción	C ₄	380	C ₆	723,64
	C ₅	1624	C ₉	1280,36
Descarte del solvente en la borra húmeda	C ₆	723,64	C ₇	343,793
			C ₈	379,847
Destilación Simple	C ₉	1280,36	C ₁₀	1218
			C ₁₁	25,262
			C ₁₂	37,098
Descarte del solvente en el Producto	C ₁₂	37,098	C ₁₃	1,421
			C ₁₄	35,677

Fuente: Elaboración propia, 2022

2.4.4.9 Balance de materia en la etapa de saponificación

El objetivo principal del presente proyecto, es la producción del jabón. Esta etapa, se trata, por tanto, de la principal del proceso, donde tiene lugar la reacción química entre un aceite con un álcali en presencia de agua, llamada saponificación, para convertirse en jabones.

En la figura 2-28, se muestra que el aceite llega al reactor de saponificación para mezclarse con la potasa caustica (KOH), ácido bórico (H₃BO₃) y el agua, para formar el jabón y el glicerol.



Fuente: Elaboración propia, 2022

Figura 2-28 Proceso de saponificación

Para establecer los porcentajes de concentración de las masas de hidróxido de potasio y ácido bórico que se adicionan al reactor en forma de disolución, se realizaron pruebas preliminares dando resultados de 39% y 34.2% en masa respectivamente. Tomándose como dato de inicio de referencia, Pita, C. M.; Pincay, D. A. (2011).

Las condiciones que se han aplicado para el cálculo de los balances de materia en la etapa de reacción han sido:

- La relación entre la cantidad de aceite y/o grasa en una reacción de saponificación se calcula mediante el índice de saponificación, que es la cantidad de álcali (KOH), en miligramos, necesaria para saponificar 1 gramo de aceite y/o grasa.

Donde el índice de saponificación del aceite de borra de café es: 182,76 mg KOH/1g aceite.

$$I_{SAP} = 182,76 \text{ mg} * \frac{36 \text{ g aceite}}{1 \text{ g aceite}} = 6579,36 \text{ mg KOH}$$

$$m_{KOH} = 6579,36 \text{ mg KOH} * \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} = 6,579 \text{ g KOH}$$

La cantidad de hidróxido de potasio necesarios para saponificar 36 g de aceite de borra de café es de: 6,579 g.

Para que se produzca la reacción de saponificación de forma efectiva, se tomó en cuenta uno de los factores principales, proporcionando el 10% de exceso de KOH.

Donde la cantidad total de hidróxido de potasio a disolver es:

$$m_{KOH\ total} = (6,579\ g\ KOH * 0,1) + 6,579\ g$$

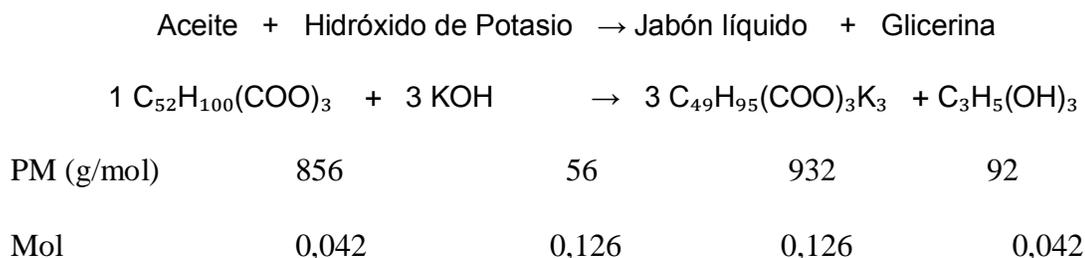
$$m_{KOH\ total} = 7,236\ g\ KOH\ introducidos$$

Donde la cantidad de KOH en exceso es:

$$m_{KOH\ exc} = 7,236\ g - 6,579\ g$$

$$m_{KOH\ exc} = 0,658\ g\ KOH\ de\ exceso$$

La reacción del proceso estudiado en este proyecto es la que tiene lugar entre el aceite de borra de café y la potasa (KOH), en presencia de agua.



Donde la cantidad de aceite que se introduce al reactor es de 36 g y los moles necesarios de aceite son:

$$n_{aceite} = 36\ g\ aceite * \frac{1\ mol}{856\ g} = 0,042\ mol\ de\ aceite$$

Por tanto, el número de moles de la glicerina es igual a 0,042 moles, por tanto, la masa de la glicerina es:

$$m_{Glicerina} = 0,042\ mol * \frac{92\ g}{1\ mol} = 3,864\ g\ de\ glicerina$$

Encontrándose la cantidad de hidróxido de potasio que se requieren para hacer reaccionar 36 gr de aceite, se puede calcular la cantidad de agua que ingresa para realizar la solución de KOH.

$$m_{KOH\ total} = 7,236\ g\ KOH$$

$$m_{KOH \text{ Diluido}} = \frac{7,236 \text{ g KOH}}{0,39} = 18,553 \text{ g KOH diluido, donde la cantidad de agua es:}$$

$$m_{H_2O \text{ entra KOH}} = 18,553 \text{ g} * 0,61 = 11,317 \text{ g H}_2\text{O, que disuelven con KOH.}$$

Encontrando los valores de las cantidades de agua necesarios para disolver el KOH

$$m_{H_2O \text{ entra KOH}} = 11,317 \text{ g H}_2\text{O, total que ingresa al reactor.}$$

Balance de materia general en la etapa de saponificación

$$C_{14} + C_{15} \rightarrow C_{16} + C_{17}$$

$$m_{Aceite} + m_{KOH \text{ total}} + m_{H_2O \text{ entra KOH}} \rightarrow C_{16} + C_{17}$$

$$36 \text{ g} + 7,236 \text{ g} + 11,317 \text{ g} = C_{16} + C_{17}$$

La corriente C_{17} : Pasta jabonosa, se determinó pesándola a través de una balanza, pasta que se apreció una vez concluida el proceso de saponificación, dejándose por un tiempo aproximado de 6hr presentando una separación de pasta jabonosa (sólido) y glicerina en fase líquida. Obteniendo una pasta jabonosa de 46,19 g. entonces:

$$54,55 \text{ g} = C_{17} + C_{16}$$

$$C_{16} = 54,55 \text{ g} - C_{17}$$

$$C_{16} = 54,55 \text{ g} - 46,19 \text{ g}$$

$$C_{16} = 8,36 \text{ g de la fase de glicerina.}$$

Obteniendo los datos de las masas de ingreso y salida de los compuestos, se calculan las composiciones (% peso) de los reactivos en los productos.

- Composiciones (% peso) en el Jabón

$$X_{\text{glicerol (Jabón)}} = \frac{3,864 \text{ g de glicerina}}{46,19 \text{ g Jabón}} * 100 = 8,36\% \text{ glicerol}$$

$$X_{H_2O \text{ (Jabón)}} = \frac{11,317 \text{ g H}_2\text{O}}{46,19 \text{ g Jabón}} * 100 = 24,5\% \text{ H}_2\text{O}$$

$$X_{KOH (Jabón)} = \frac{7,236 \text{ g KOH}}{46,19 \text{ g}} * 100 = 15,66 \% KOH$$

La sumatoria de todas las composiciones (% peso) es el 100%, por lo tanto:

$$X_{glicerol (Jabón)} + X_{Jabon} + X_{H_2O} + X_{KOH (Jabón)} = 100\%$$

$$\text{Entonces } X_{Jabón} = 100 - 8,36\% \text{ glicerol} - 24,5 \% H_2O - 15,66 \% KOH$$

$$X_{Jabon} = 51.48 \% Jabon$$

- Composiciones (% peso) en la glicerina

$$X_{glicerol (glicerina)} = \frac{3,864 \text{ g de glicerina}}{8,36 \text{ g glicerina.}} * 100 = 46,22 \% (glicerol)$$

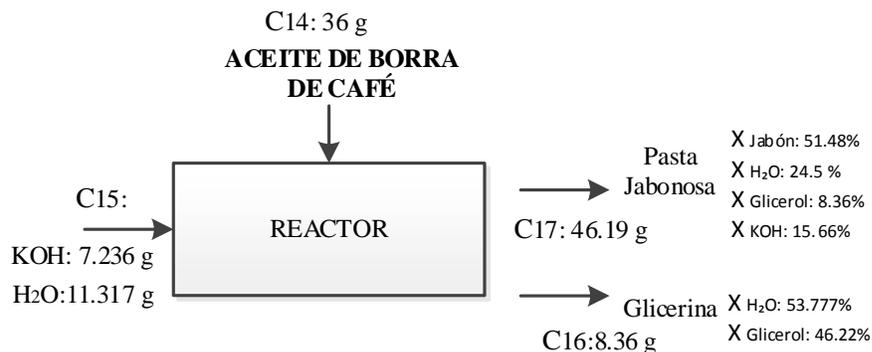
La sumatoria de todas las composiciones (% peso) es el 100%, por lo tanto:

$$X_{glicerol (Glicerina)} + X_{H_2O (glicerina)} = 100\%$$

$$\text{Entonces } X_{H_2O (glicerina)} = 100 - 46,22 \% (glicerol)$$

$$X_{H_2O (glicerina)} = 53,77 \% H_2O (glicerina)$$

En la figura 2-29, se muestran los resultados de las composiciones en los productos en el proceso de reacción entre el aceite, el álcali y el ácido bórico.

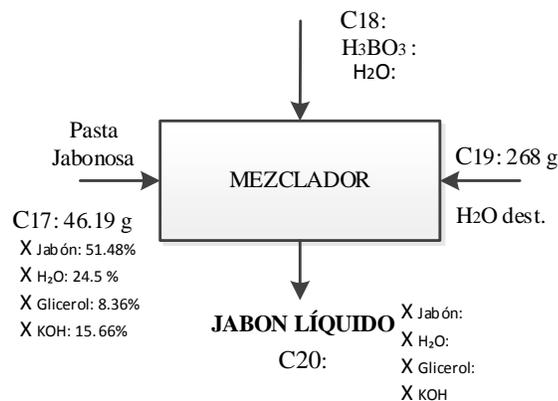


Fuente: Elaboración propia, 2022

Figura 2-29 Resultados de las cantidades y composiciones en el proceso de saponificación

2.4.4.10 Balance de materia en la etapa de mezclado

En la figura 2-30, se muestra la última etapa del proceso que es el mezclado del jabón base obtenido en la saponificación anterior, con más agua, para obtener el jabón líquido con el aspecto físico (textura de gel, aroma y color) deseados.



Fuente: Elaboración propia, 2022

Figura 2-30 Proceso de mezclado

Como se indica en el proyecto se utiliza el 6% de H₃BO₃ en peso de la pasta jabonosa a introducir al mezclador a una concentración del 34.2% con la finalidad de neutralizar el exceso de hidróxido de potasio

$$m_{H_3BO_3} = m_{P,Jabonosa} * 0,06$$

$$m_{H_3BO_3} = 46.19 \text{ g} * 0,06 = 2,77 \text{ g } H_3BO_3$$

Por lo que la masa de H₃BO₃ diluida seria:

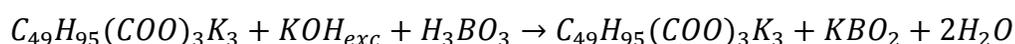
$$m_{H_3BO_3 \text{ diluida}} = 2,77 \text{ g } H_3BO_3 * \frac{1}{0,342} = 8,10 \text{ g } H_3BO_3 \text{ diluido}$$

Encontrando la masa diluida de H₃BO₃ se puede calcular la cantidad de H₂O que se requirió para disolver el ácido.

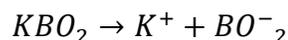
$m_{H_2O \text{ entra } H_3BO_3} = 8,10 \text{ g} * 0,658 = 5,33 \text{ g } H_2O$, necesarios para disolver el H_3BO_3 , tomando en cuenta la densidad del agua 0,997gr/ml, dando un volumen del agua 5,35 ml

$$\text{Calculado la molaridad: } M = \frac{n \text{ (mol)}}{V \text{ (l)}} = \frac{\frac{2,77 \text{ g}}{61,83 \text{ g/mol}}}{5,35 * 10^{-3} \text{ (l)}} = 8,374 \text{ mol/l}$$

Donde en el proceso de mezclado se produce una reacción química de neutralización entre en exceso de hidróxido de potasio y el ácido bórico:

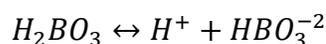


Donde el KBO_2 se disocia por completo en:



Dando que el potasio no se hidroliza, por lo tanto, se hidroliza el dióxido de boro:

$BO_2^- + H_2O \rightarrow H_2BO_3$, presentándose la formula y ecuación de ionización



$$\begin{array}{l} t_0: \quad c_1 \quad \quad 0 \quad \quad c_2 \\ t_1: \quad c_1 - x \quad \quad x \quad \quad c_2 + x \end{array}$$

Por lo tanto, se determina la concentración del analito, en función al volumen de la solución de ácido bórico que reacciona con el exceso de hidróxido de potasio presente en la pasta jabonosa.

En la pasta jabonosa se añade 3 gotas de fenolftaleína. Por medio de una titulación, se añade lentamente desde una bureta la solución de ácido bórico, con una molaridad calculada de 8,374 M, utilizando 15 ml para neutralizar el exceso de KOH. Así también se calculó la molaridad de la pasta jabonosa 2,72 M, tomándose como una base de cálculo el volumen de 46,19 ml.

$$[H_2BO_3] = \frac{M_{H_3BO_3} * V_{H_3BO_3} - M_{P.Jabonosa} * V_{P.Jabonosa}}{V_{H_3BO_3} + V_{P.Jabonosa}} = c1$$

$$[H_2BO_3] = \frac{8,374 * 15 - 2,72 * 46,19}{15 + 46,19} = -0,000437 \frac{\text{mol}}{\text{l}}$$

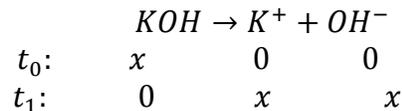
$$[KBO_2] = \frac{M_{P.Jabonosa} * V_{P.Jabonosa}}{V_{H_3BO_3} + V_{P.Jabonosa}} = c_2$$

$$[KBO_2] = \frac{2,72 * 46,19}{15 + 46,19} = 2,05 \text{ mol/l}$$

Al obtener un dato negativo de concentración, indica una reacción de ácido débil con una base fuerte, donde el exceso de KOH y BO_2^- , se originan en procesos:



Es una aproximación satisfactoria considerar que el pH del jabón líquido se debe únicamente al exceso de KOH, despreciando la influencia del BO_2^- , se encuentra el pH dándose la vuelta la reacción.



$$[OH^-] = \frac{M_{P.Jabonosa} * V_{P.Jabonosa} - M_{H_3BO_3} * V_{H_3BO_3}}{V_{H_3BO_3} + V_{P.Jabonosa}} = x$$

$$[OH^-] = \frac{2,720 * 46,190 - 8,374 * 15}{15 + 46,190} = 4,379 * 10^{-4} \text{ mol/l}$$

$$pOH = -\log[OH^-]$$

$$pOH = -\log(4,379 * 10^{-4})$$

$$pOH = 3.35, \text{ para encontrar el pH de la mezcla se precede a restar: } pH = 14 - pOH,$$

Por lo tanto, el pH del jabón líquido neutralizado con ácido bórico es:

$$pH = 14 - 3.35 = \mathbf{10.64}$$

Por lo que el pH obtenido está bajo las condiciones de los límites permisibles según la norma: NTN INEN 842:07.

Encontrando los valores de las cantidades de agua necesarios para disolver el H_3BO_3 , se logra obtener la cantidad total de agua que ingresan al mezclador.

$$m_{H_2O} \text{ (dilución)} = m_{H_2O} \text{ entra } H_3BO_3 + m_{H_2O} \text{ entra al mezclador}$$

Como la cantidad de solución de ácido bórico para neutralizar fue de 15ml se utilizaron un aproximado de 1,85 veces la misma cantidad de agua requerida para disolver y en la cantidad de ácido bórico dando 5,12 g.

$$m_{H_2O} (\text{dilución}) = (5,33) * 1,85 \text{ g } H_2O + 268 \text{ g } H_2O,$$

$$m_{H_2O} (\text{dilución}) = 277,86 \text{ g } H_2O, \text{ total que ingresa al mezclador.}$$

Realizando un balance de materia general en la etapa de mezclado se obtiene:

$$C_{17} + C_{18} + C_{19} \rightarrow C_{20}$$

$$m_{\text{pasta jabonosa}} + m_{H_3BO_3} + m_{H_2O} (\text{dilución}) = C_{20}$$

$$46,19 \text{ g} + 5,12 \text{ g} + 277,86 \text{ g} = C_{20}$$

$$C_{20} = 329,17 \text{ g}, \text{ cantidad de jabón líquido obtenido.}$$

Como se aprecia en la figura 2-31, se cuenta con las composiciones en los reactivos, por lo que se requiere encontrar las composiciones (% peso) del producto.

$$X_{\text{jabon}} (\text{jabón líquido}) = \frac{m_{\text{jabón}}}{m_{\text{jabón líquido}}} * 100$$

$$X_{\text{jabon}} (\text{jabón líquido}) = \frac{46,19 * 0,5148}{329,17} * 100 = 7,22 \% \text{ jabón}$$

Para calcular las composiciones de agua en el producto se debe tomar en cuenta la masa de agua que entra del jabón como el agua pura que ingresa para que el jabón sea diluido.

$$m_{H_2O} (\text{mezcla}) = m_{H_2O} (\text{jabón}) + m_{H_2O} (\text{dilución})$$

$$m_{H_2O} (\text{mezcla}) = (46,19 \text{ g} * 0,245) + 277,86 \text{ g} = 289,18 \text{ g } H_2O (\text{mezcla})$$

Por tanto, la cantidad del agua en el jabón líquido es:

$$X_{H_2O} (\text{jabón líquido}) = \frac{289,18 \text{ g } H_2O (\text{mezcla})}{329,17 \text{ g } \text{jabon líquido}} * 100$$

$$X_{H_2O} (\text{jabón líquido}) = 87,85 \% H_2O (\text{en el jabón líquido})$$

La cantidad de hidróxido de potasio en el jabón líquido es:

$$X_{KOH} (\text{jabón líquido}) = \frac{46,19 * 0,1566}{329,17g \text{ jabón líquido}} * 100$$

$$X_{KOH} (\text{jabón líquido}) = 2,19 \% KOH(\text{en el jabón líquido})$$

Así también, la composición del glicerol en el jabón líquido es:

$$X_{glicerol} (\text{jabón líquido}) = \frac{(46,19 * 0,0836) \text{ gr glicerol}}{329,17 \text{ g jabón líquido}} * 100$$

$$X_{glicerol} (\text{jabón líquido}) = 1,17 \% \text{ glicerol (jabón líquido)}$$

Y, por último: la composición de hidróxido de potasio se encontrará por diferencia, siendo la sumatoria de las composiciones (% peso) iguales al 100%

$$X_{KOH} = 100 - (X_{glicerol} + X_{H_2O} + X_{Jabon})_{\text{jabón líquido}}$$

$$X_{KOH} = 100 - (1,17glicerol + 87,85 H_2O + 7,22 jabón) = 3.76 \%$$

2.4.4.10 Resumen general de balance de materia en el proceso de obtención de jabón líquido

En la tabla II-19, se resume general de balance de materia en el proceso de saponificación, presentando las corrientes de entrada y salida en cada proceso, donde el contenido de las corrientes se describe en la tabla II-17.

Tabla II-19: Resumen de balance de materia en el proceso de saponificación

		Entrada		Salida	
Corriente		C ₁₄	C ₁₅	C ₁₆	C ₁₇
Cantidad (g)		36	18,553	8,36	46,19
Composición (% peso)	Glicerol			46,22%	8,36%
	H ₂ O		60,96%	53,77%	24,50%
	Jabón				51,48%
	KOH		39,04%		15,66%

Fuente: Elaboración propia, 2022

Tabla II-20: Resumen de balance de materia en el proceso de mezclado

		Entrada			Salida
Corriente		C ₁₇	C ₁₈	C ₁₉	C ₂₀
Cantidad (g)		46,19	15	268	329,17
Composición (%peso)	Glicerol	8,36%			1,17%
	H ₂ O	24,50%	65,80%	100,00%	87,85%
	H ₃ BO ₃		34,20%		-
	Jabón	51,48%			7,22%
	KOH	15,66%			3,76%

Fuente: Elaboración propia, 2022

La tabla II-20, se detalla el resumen del balance de materia en el proceso de mezclado, obteniendo 329,17 gr de jabón líquido. Cuyas composiciones en porcentaje en peso de jabón es de 7,72%, una composición de agua de 87,85%, glicerol 1.17% y un 3,76% de KOH. La existencia de %KOH en el jabón líquido es debido a que no se ha neutralizado por completo el exceso de KOH, ya que se demuestra por medio de cálculos en una reacción de neutralización de ácido débil (siendo el reactivo limitante el ácido bórico) y base fuerte (el reactivo en exceso), obteniéndose así un pH de 10,64 el cual se demuestra que la mezcla es básica, pero está bajo las condiciones de los límites permisibles de jabón líquido según la norma: NTN INEN 842:07.

2.4.5 Balance de energía del proceso tecnológico experimental para la extracción de aceite de la borra de café

Para realizar el balance de energía se deben considerar los procesos que impliquen un intercambio de energía dentro del sistema.

Aplicando la primera ley de la termodinámica “Ley de la conservación de la energía”. Si la frontera de un sistema no permite el transporte de materia entre el sistema y sus alrededores, entonces se dice que el sistema es cerrado, descrita mediante la siguiente ecuación. (Smith & Abbott, 1996)

$$\Delta E_{\text{cinética}} + \Delta E_{\text{potencial}} + \Delta U = Q + W \quad (\text{Ecuación 2-1})$$

Los sistemas cerrados a menudo experimentan procesos donde la de energía cinética y potencial son tan pequeños que pueden considerarse a estos como despreciables, sino solamente en su energía interna. Smith & Abbott (1996).

$$\Delta E_{\text{cinética}} + \Delta E_{\text{potencial}} = 0$$

Como el sistema se encuentra estacionario, el volumen se mantiene constante por lo cual no se efectúa el trabajo en el sistema. Smith & Abbott (1996).

$$W = 0$$

Entonces la ecuación es:

$$\Delta U = Q \quad (\text{Ecuación 2-2})$$

$$Q_{\text{cedido}} = Q_{\text{ganado}}$$

Según (Smith & Abbott, 1996), para un sistema estacionario a volumen constante el calor sensible y latente es igual a:

$$Q_{\text{Sensible}} = m C_p \Delta T \quad (\text{Ecuación 2-3})$$

$$Q_{\text{latente}} = m * \lambda \quad (\text{Ecuación 2-4})$$

Donde:

m = Masa del componente (Kg)

C_p = Capacidad calorífica (Kcal/ Kg °C)

ΔT = Diferencial de temperatura (°C)

T_f = Temperatura final (°C)

T_i = Temperatura inicial (°C)

λ = Calor latente de vaporización (Kcal/Kg)

2.4.5.1 Balance de energía en el proceso de secado de la borra de café

Con las masas de cada corriente calculadas, ahora se procede a calcular el calor neto necesario en cada unidad. El calor específico de la borra de café y el extracto se

calcularon de acuerdo a Choi y Okos, que permite calcular este parámetro de acuerdo a la composición del material.

Tabla II-21: Calor específico (J/kg*K) de acuerdo Choi y Okos

<i>Proteínas</i>	$C_p = 2,0082 * 10^3 + 1,2089 * T - 1,3129 * 10^{-3} * T^2$
<i>Lípidos</i>	$C_p = 1,9842 * 10^3 + 1,4733 * T - 4,8008 * 10^{-3} * T^2$
<i>Carbohidratos</i>	$C_p = 1,5488 * 10^3 + 1,9625 * T - 5,9399 * 10^{-3} * T^2$
<i>Fibra</i>	$C_p = 1,8459 * 10^3 + 1,8306 * T - 4,6509 * 10^{-3} * T^2$
<i>Cenizas</i>	$C_p = 1,0926 * 10^3 + 1,8896 * T - 3,6817 * 10^{-3} * T^2$
<i>Humedad</i>	$C_p = 4,1762 * 10^3 + 9,0864 * T^{-2} + 5,4731 * 10^{-3} * T^2$

Fuente: CHOI, Y. & OKOS, M.R. Efectos de la temperatura y la composición sobre las propiedades térmicas de los alimentos.

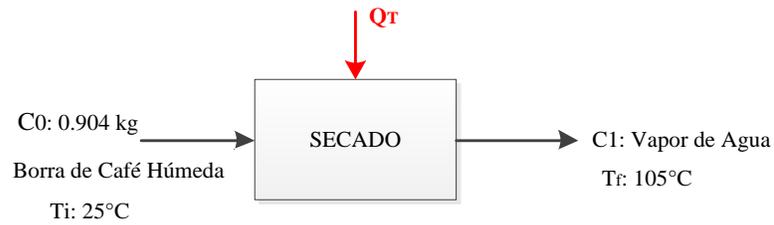
Con estas ecuaciones establecidas, se realizó una ponderación del calor específico teniendo en cuenta el Cp y la composición de cada componente, obteniendo un único resultado. La composición de la borra de café húmeda, seca. El calor específico del extracto se calculó teniendo en cuenta que, de acuerdo a las experimentaciones realizadas, el 62,71% corresponde a lípidos, mientras que el 37,29% corresponde a otros compuestos, principalmente azúcares y carbohidratos de bajo peso molecular.

Tabla II-22: Calor específico para la borra de café y el extracto

Corriente	Descripción	Temperatura (°C)	Calor específico Cp (kJ/kg *°C)
C2	Borra seca	105	1,8562
C6	Borra de café luego de la extracción	72,3	1,4073
C14	Aceite	30	1,0215

Fuente: Elaboración propia, 2021

En la figura 2-31, se muestra el balance de energía para la borra de café. Así mismo, se extrajeron valores de calores específicos de la tabla II-18.



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 2-31 Proceso del secado de la borra de café

Datos de calores específicos, tomados de la tabla II-18:

$$cp_{Borra\ seca} = 0,443 \frac{kcal}{kg\ ^\circ C}$$

$$cp_{Agua} = 1 \frac{kcal}{kg\ ^\circ C}$$

Para calcular el calor sensible en el proceso de secado, se tomó en cuenta la ecuación (2-3) mencionada por (Smith & Abbott, 1996), donde: el calor específico de la borra de café seco es de 0,443 (kcal/kg °C) y el calor específico para el agua 1 (kcal/kg °C).

$$Q_S = m * cp * \Delta T$$

$$Q_S = (C_2 * cp_{Borra\ seca} + C_1 * cp_{Agua}) * (T_f - T_i)$$

$$Q_S = \left(0,387\ kg * 0,443 \frac{kcal}{kg\ ^\circ C} + 0,517 * 1 \frac{kcal}{kg\ ^\circ C} \right) * (105 - 25)^\circ C$$

$$Q_S = 55,04\ kcal$$

El calor sensible para el proceso de secado de la borra de café es de 55,04 kcal.

Para calcular el calor latente para evaporar el contenido de agua, primero se calcula la potencia de la estufa para lo cual se requiere el tiempo de calentamiento:

$$tc_{secado} = 0,5\ hr$$

Donde la ecuación de potencia se representa como el calor sensible en un determinado tiempo.

$$Pot = \frac{Q_{Sensible}}{tc} \quad (\text{Ecuación 2-4})$$

$$Pot = \frac{Q_s}{tc_{secado}}$$

$$Pot = \frac{55,04 \text{ kcal}}{0,5 \text{ hr}} = 110,08 \text{ kcal/hr}, \text{ potencia de la estufa en el tiempo de calentamiento.}$$

Posteriormente para calcular el calor latente se multiplica la potencia de la estufa con el tiempo de la etapa de Secado:

$$t_{secado} = 3 \text{ hr}$$

$$Q_l = Pot * t_{secado}$$

$$Q_l = 110,08 \frac{\text{kcal}}{\text{hr}} * 3 \text{ hr}$$

$$Q_l = 330,24 \text{ kcal}$$

$$Q_T = Q_s + Q_l$$

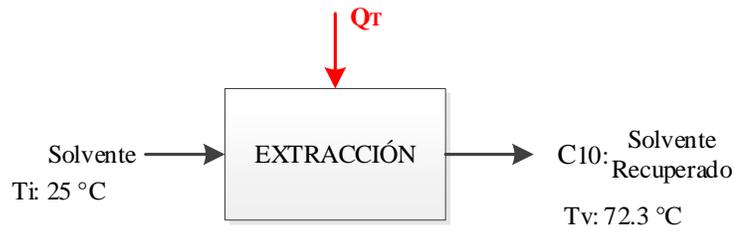
$$Q_T = 55,04 \text{ kcal} + 330,24 \text{ kcal}$$

$$Q_T = 385,28 \text{ kcal}$$

El calor necesario para el proceso de secado de la borra de café es de 385,28 kcal.

2.4.5.2 Balance de energía en el proceso de extracción de aceite de la borra de café

Para calcular la energía requerida en la etapa de extracción, se debe determinar el calor sensible debido al calentamiento del solvente desde 25 °C hasta 72.3 °C con la presencia de borra de café seco molido, donde el calor específico del solvente (Etanol) es 0,5875 (kcal/kg °C) este proceso se realizó en el extractor Soxhlet. En la figura 2-32, representa el sistema utilizado para el proceso de extracción.



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 2-32 Proceso de extracción para el balance de energía

Datos:

$$cp_{\text{Solvente}} = 0,5875 \frac{\text{kcal}}{\text{kg } ^\circ\text{C}}$$

$$Q_s = m * cp * \Delta T$$

$$Q_s = (C_s * cp_{\text{Solvente}}) * (T_v - T_i)$$

$$Q_s = \left(1,624 \text{ kg} * 0,5875 \frac{\text{kcal}}{\text{kg } ^\circ\text{C}} \right) * (72,3 - 25)^\circ\text{C}$$

$$Q_s = 45,090 \text{ kcal}$$

Para calcular el calor latente para evaporar el solvente, primero se calcula la potencia del calentador para lo cual se requiere el tiempo de calentamiento:

$$t_{\text{Extracción}} = 20 \text{ min} = 0,333 \text{ hr}$$

$$Pot = \frac{Q_s}{t_{\text{Extracción}}}$$

$$Pot = \frac{45,090 \text{ kcal}}{0,333 \text{ hr}} = 135,405 \text{ kcal/hr}$$

Posteriormente para calcular el calor latente se multiplica la potencia del calentador con el tiempo de la etapa de Extracción:

$$t_{\text{Extracción}} = 6 \text{ hr}$$

$$Q_{\text{Extracción}} = Pot * t_{\text{Extracción}}$$

$$Q_{l \text{ extracción}} = 135,405 \frac{\text{kcal}}{\text{hr}} * 6 \text{ hr}$$

$Q_{l \text{ extracción}} = 812,432 \text{ kcal}$, de calor latente necesarios en el proceso de extracción.

$$Q_{T \text{ extracción}} = Q_s + Q_l$$

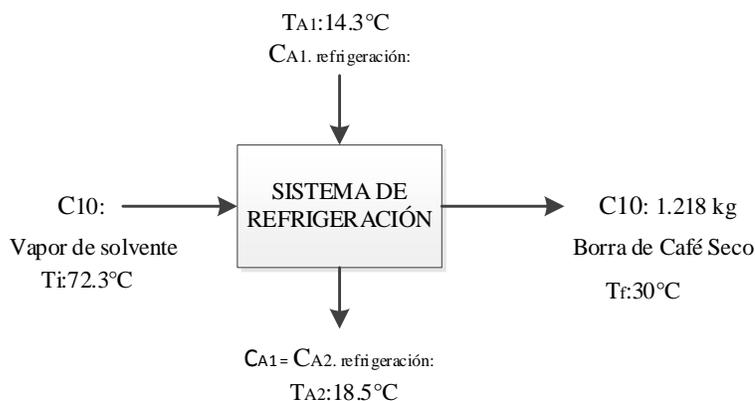
$$Q_{T \text{ extracción}} = 45,090 + 812,432 \text{ kcal}$$

$$Q_{T \text{ extracción}} = 857,522 \text{ kcal}$$

La energía total que requiere el sistema para llevar a cabo el proceso de extracción es 857,522 kcal.

2.4.5.3 Balance de energía en el sistema de Refrigeración

Para calcular la energía requerida en el sistema de refrigeración, se debe determinar la masa de agua de alimentación, masa de vapor en la cámara de extracción calor recibido y cedido del vapor del solvente. tomándose en cuenta que el tiempo total del sistema de refrigeración es la suma del tiempo en el proceso de extracción más el tiempo de destilación para la recuperación de solvente. En la figura 2-33, representa el proceso utilizado para el sistema de refrigeración.



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 2-33 Sistema de refrigeración para el balance de energía

Se requiere calcular la masa de agua de refrigeración que entra por la corriente A1, donde para ello se calcula el calor latente, tomándose la potencia del calentador de 135,405 kcal/ hr y un tiempo total del sistema de refrigeración de 8 horas.

$$Q_l = Pot * t_{Extracción}$$

$$Q_l = 1083,24 \text{ kcal}$$

Por lo que el flujo másico del agua es: 140,84 kg/h y tiempo de extracción más destilación: 8 h. Entonces:

$$C_{A1} = 140,84 \frac{kg}{hr} * 8hr = 1126,72 \text{ kg}$$

La cantidad de agua que ingresa al sistema de refrigeración es 1126,72 kg.

A partir de la cantidad de masa de agua que ingresa se puede encontrar el calor de vaporización del solvente con la siguiente ecuación 2-5.

$$\Phi_{vap} = Q_L/M_V \quad (\text{Ecuación 2-5})$$

Donde la masa de vapor (Mv) en la cámara de extracción son las sumas de cantidades de solvente en el proceso de extracción (recuperado) y en el descarte del solvente en la borra de café húmeda (evaporación).

$$M_V = C_{10} + C_7$$

$$M_V = 1,218 \text{ kg} + 0,344 \text{ kg}$$

$$M_V = 1,562 \text{ kg}$$

Obteniendo el valor de Mv, se reemplaza en la ecuación 2-5, obteniendo el calor de vaporización.

$$\Phi_{vap} = 1083,24 \frac{kcal}{1,562 \text{ kg}} = 693,495 \text{ kcal/kg}$$

Por lo tanto, se determina el calor cedido por el vapor del solvente mediante la ecuación 2-6.

$$C_{10} = 1,218 \text{ kg}$$

$$Q_C = m_{V.Solvente} * \Phi_{vap} + m_{V.Solvente} * cp_{Solvente} * (T_f - T_i) \quad (\text{Ecuación 2-6})$$

$$Q_C = 1,218 \text{ kg} * 693,495 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} + 1,218 \text{ kg} * 0,5875 \frac{\text{kcal}}{\text{kg} \text{ } ^\circ\text{C}} * (30 - 72,3)^\circ\text{C}$$

$$Q_C = 810,830 \text{ kcal}$$

El calor cedido por el vapor del solvente en el sistema de refrigeración es 810,830 kcal.

En el sistema de refrigeración, el flujo de agua que ingresa es la misma que sale del sistema, pero no así las temperaturas de ingreso y salida. Por lo que se calcula el calor recibido del vapor del solvente, mediante la ecuación 2-7.

$$C_{A1} = C_{A2} = 1126,72 \text{ kg}$$

$$cp_{Agua} = 1 \frac{\text{kcal}}{\text{kg} \text{ } ^\circ\text{C}}$$

$$Q_R = C_{A1} * cp_{Agua} * (T_2 - T_1) \quad (\text{Ecuación 2-7})$$

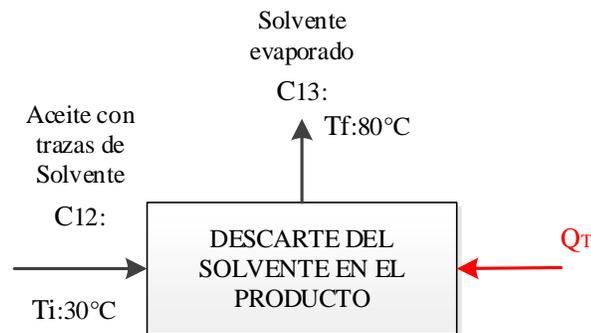
$$Q_R = 1126,72 \text{ kg} * 1 \frac{\text{kcal}}{\text{kg} \text{ } ^\circ\text{C}} * (18,5 - 14,3)^\circ\text{C}$$

$$Q_R = 4732,224 \text{ kcal}$$

Obteniéndose el calor recibido por el vapor del solvente en el sistema de refrigeración de 4732,224 kcal.

2.4.5.4 Balance de energía en el proceso de descarte del solvente en el producto

Para calcular la energía requerida en la etapa de descarte del solvente en el producto, se debe determinar el calor sensible debido al calentamiento del aceite con trazas de solvente, desde 30 °C hasta 80 °C, donde el calor específico del solvente (Etanol) es 0,5875 (kcal/kg °C) y del aceite de borra de café es 0,244 kcal/kg °C este proceso se realizó en una estufa. En la figura 2-34, representa el sistema utilizado para el proceso de descarte del solvente en el producto.



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 2-34 Proceso de descarte del solvente en el producto para el balance de energía

Se calcula el calor sensible para subir la temperatura del solvente hasta el punto de ebullición para eliminar las trazas de solvente presente en el aceite, donde el calor específico del aceite de la borra de café es obtenido de la tabla II-18, el mismo se expresa en KJ/kg°C y es convertido en las condiciones de Kcal/kg°C.

$$Q_S = m * cp * \Delta T$$

$$Q_S = (C_{12} * cp_{Mezcla}) * (T_f - T_i)$$

$$Q_S = (C_{14} * cp_{Aceite} + C_{13} * cp_{Solvente}) * (T_f - T_i)$$

$$cp_{Aceite} = 0,244 \frac{kcal}{kg \text{ } ^\circ C}$$

$$Q_S = \left(0,0356 \text{ kg} * 0,244 \frac{kcal}{kg \text{ } ^\circ C} + 0,00142 \text{ kg} * 0,5875 \frac{kcal}{kg \text{ } ^\circ C} \right) * (80 - 30)^\circ C$$

$$Q_S = 0,477 \text{ kcal}$$

El calor sensible en el proceso de descarte del solvente en el producto es 0,477 kcal.

Para calcular el calor latente en la vaporización del solvente, primero se calcula la potencia de la estufa para lo cual se requiere el tiempo de calentamiento:

$$tc_{Estufa} = 30 \text{ min} = 0,5 \text{ hr}$$

$$Pot = \frac{Q_s}{t_{C_{Estufa}}}$$

$$Pot = \frac{0,477 \text{ kcal}}{0,5 \text{ hr}} = 0,954 \text{ kcal/hr}$$

Posteriormente para calcular el calor latente, se multiplica la potencia de la estufa con el tiempo de la etapa de descarte del solvente en el producto:

$$t_{Desol.Producto} = 1 \text{ hr}$$

$$Q_l = Pot * t_{Desol.Producto}$$

$$Q_l = 0,954 \frac{\text{kcal}}{\text{hr}} * 1 \text{ hr}$$

$$Q_l = 0,954 \text{ kcal}$$

$$Q_T = Q_s + Q_l$$

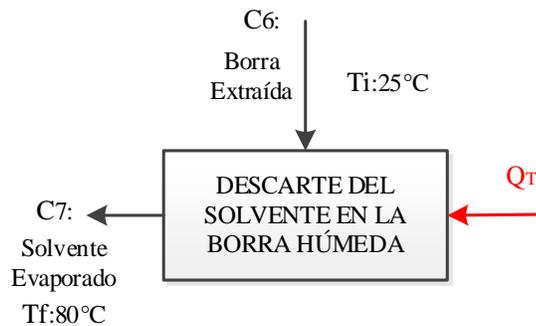
$$Q_T = 0,477 \text{ kcal} + 0,954 \text{ kcal}$$

$$Q_T = 1,430 \text{ kcal}$$

Donde el calor total necesario para eliminar las trazas de solvente en el aceite de borra de café es 1,430 kcal.

2.4.4.6 Balance de energía en el descarte del solvente en la borra extraída

Para calcular la energía requerida en la etapa de descarte del solvente en la borra extraída, se debe determinar el calor sensible desde 25 °C hasta 80 °C de temperatura, donde el calor específico del solvente (Etanol) es 0,5875 (kcal/kg °C) y de la borra extraída es 0,3361(kcal/kg °C) En la figura 2-35, representa el sistema utilizado para el proceso de descarte del solvente en el producto. Los datos de calor específico de la borra extraída se muestra en la tabla II-18.



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 2-35 Proceso de eliminación de solvente en la borra de café húmeda

Se calcula el calor sensible donde la temperatura del solvente para su evaporación sube hasta el punto de ebullición.

$$Q_S = m * cp * \Delta T$$

$$Q_S = (C_6 * cp_{Mezcla}) * (T_f - T_i)$$

$$Q_S = (C_8 * cp_{Borra Ext.} + C_7 * cp_{Solvente}) * (T_f - T_i)$$

$$cp_{Borra Ext.} = 0,3361 \frac{kcal}{kg \text{ } ^\circ C}$$

$$Q_S = \left(0,3798g * 0,3361 \frac{kcal}{kg \text{ } ^\circ C} + 0,3437 kg * 0,5875 \frac{kcal}{kg \text{ } ^\circ C} \right) * (80 - 25)^\circ C$$

$$Q_S = 18,131 kcal$$

Para calcular el calor latente para evaporar el solvente, primero se calcula la potencia de la estufa para lo cual se requiere el tiempo de calentamiento:

$$tc_{Estufa} = 30 \text{ min} = 0,5 \text{ hr}$$

$$Pot = \frac{Q_S}{tc_{Estufa}}$$

$$Pot = \frac{18,131 kcal}{0,5 \text{ hr}} = 36,262 kcal/hr$$

Posteriormente el calor latente se multiplica, la potencia de la estufa con el tiempo de la etapa de descarte del solvente en la borra extraída: $t_{Desol.Borra} = 5 \text{ hr}$

$$Q_l = Pot * t_{Desol.Producto}$$

$$Q_l = 36,262 \frac{\text{kcal}}{\text{hr}} * 5 \text{ hr}$$

$$Q_l = 181,31 \text{ kcal}$$

$$Q_T = Q_S + Q_l$$

$$Q_T = 18,131 \text{ kcal} + 181,31 \text{ kcal}$$

$$Q_T = 191,441 \text{ kcal}$$

Donde el calor total suministrado para evaporar las trazas de solvente en la borra de café extraída es 191,441 kcal.

2.4.6 Cinética de la reacción química en el proceso de saponificación

La cinética química es el estudio de las velocidades de las reacciones químicas y de los mecanismos mediante los que tienen lugar. Introduce la variable de tiempo en el estudio de las reacciones químicas y el camino que siguen los reactivos para convertirse en productos.

Por esta razón es tan importante obtener los parámetros cinéticos característicos de la reacción química.

La ecuación de velocidad general de una reacción química:

$$(-r_A) = k * c_A^\alpha * c_B^\beta \quad (\text{Ecuación 2-8})$$

con,

k = constante cinética (L/mol*min).

α y β = órdenes de reacción.

Si $\alpha = \beta = 1$, la reacción será bimolecular y la velocidad será de segundo orden:

$$(-r_A) = k * c_A * c_B \quad \text{(Ecuación 2-9)}$$

c_A : concentración del aceite en el instante final (mol/L).

c_B : concentración del KOH en el instante final (mol/L).

Si uno de los reactivos se encuentra en exceso, para que haya una saponificación completa, se tiene que ($c_{B0} \gg c_{A0}$). En el caso que se describe en este proyecto habrá un exceso de potasa respecto al aceite, que es el reactivo limitante y por tanto el que controla la reacción.

Como el reactivo B está en exceso, se podrá englobar la constante cinética como una constante aparente según la ecuación 2-10:

$$k' = c_{B0} * k \quad \text{(Ecuación 2-10)}$$

Y por tanto la velocidad de reacción se ve simplificada a:

$$(-r_A) = k' * c_A \quad \text{(Ecuación 2-11)}$$

Se trata de una ecuación de pseudo primer orden, con k' , la constante aparente (L/mol*min).

En el caso que nos ocupa (generación de materia por reacción química), la saponificación de los triglicéridos contenidos en el aceite, es un proceso intrínsecamente discontinuo, por lo que los términos de entrada y salida se consideran nulos, y la ecuación 2-12 queda simplificada a la siguiente expresión (ecuación 2-13):

$$\begin{aligned} &(\text{Entrada de materia al sistema}) + \\ &(\text{Generación de materia por reacción química}) = \\ &(\text{Salida de materia del sistema}) + (\text{Acumulación de materia en el sistema}) \end{aligned}$$

(Ecuación 2-12)

$$\begin{aligned} &(\text{Generación de materia por reacción química}) = \\ &(\text{Acumulación de materia en el sistema}) \end{aligned} \quad \text{(Ecuación 2-13)}$$

$$(-r_A) * V = - \frac{dN_A}{dt} \quad \text{(Ecuación 2-14)}$$

Donde:

$(-r_A)$: velocidad de reacción química (mol/L*s).

V: volumen del reactor (L).

(dN_A/dt) : cambio en el nº de moles de aceite en un instante de tiempo t determinado (moles/s).

Sabiendo que la especie que controla la reacción, o sea el reactivo limitante, es el aceite, se tienen las siguientes ecuaciones:

2.4.6.1 Conversión del aceite durante la reacción

$$x_A = \frac{N_{A0} - N_A}{N_{A0}} \quad (\text{Ecuación 2-15})$$

Donde:

x_A = conversión del aceite durante la reacción (%).

N_{A0} = Número de moles de aceite inicialmente (moles).

N_A = Número de moles de aceite a tiempo t (moles).

2.4.6.2 Concentración del aceite en función del número de moles y del volumen

$$c_A = \frac{N_A}{V} \quad (\text{Ecuación 2-16})$$

con, c_A = concentración de aceite al final de la reacción.

2.4.6.3 Cálculo del tiempo de reacción en el proceso de saponificación

Para una reacción química de segundo orden. Se sabe que el componente B, que es la disolución de KOH, está en exceso respecto al aceite, 3 moles de KOH por cada mol de aceite, por tanto, la cinética de la reacción de saponificación se puede suponer de pseudo - primer orden, expresada en la ecuación 2-11.

Sustituyendo las ecuaciones 2-15, 2-16 y 2-11, en la ecuación 2-12, que es la expresión del balance para un reactor discontinuo e isoterma, se obtiene finalmente que:

$$(-r_A) * V = -N_A * \frac{dx_A}{dt}$$

Despejando dt e integrando se obtiene.

$$\int_0^t dt = - \int_{N_{A0}}^{N_A} \frac{N_{A0}}{(-r_A)*V} dx_A \quad (\text{Ecuación 2-17})$$

Despejando N_{A0} de la ecuación 2-16, el número de moles del aceite inicialmente se reemplaza en la ecuación 2-17, obteniendo:

$$t = - \int_{N_{A0}}^{N_A} \frac{c_{A0}*v}{(-r_A)*V} dx_A \quad (\text{Ecuación 2-18})$$

Simplificando los volúmenes, se obtiene

$$t = c_{A0} * \int_{X_{A0}}^{X_A} \frac{1}{(-r_A)} dx_A \quad (\text{Ecuación 2-19})$$

Donde se sustituye la ecuación 2-11, en la ecuación 2-19, obteniendo

$$t = c_{A0} * \frac{X_A}{(-r_A)} \quad (\text{Ecuación 2-20})$$

$$t = c_{A0} * \frac{X_A}{k' * c_A} \quad (\text{Ecuación 2-21})$$

reemplazando la ecuación 2-15 y 2-16 en la ecuación 2-21 se obtiene:

$$t = \frac{N_{A0}}{V} * \frac{\frac{N_{A0}-N_A}{N_{A0}}}{k' * \frac{N_A}{V}} \quad (\text{Ecuación 2-22})$$

$$t = \frac{N_{A0}-N_A}{k' N_A} \quad (\text{Ecuación 2-23})$$

Donde despejando N_A de la ecuación 2-15, se reemplaza en la ecuación 2-23

$$t = \frac{N_{A0}-N_{A0}(1-X_A)}{k' N_{A0}(1-X_A)} \quad (\text{Ecuación 2-24})$$

Por lo que separando entre fracciones se simplifican los números de moles de aceite iniciales, obteniendo así la ecuación del tiempo de reacción.

$$t = \frac{1}{k'} * \frac{1}{(1-x_A)} \quad (\text{Ecuación 2-25})$$

Por tanto:

t: tiempo de reacción (min).

k': constante aparente de la reacción (min^{-1}).

x_A : conversión del aceite al final de la reacción.

De acuerdo a Asiagwu, A.K., Omuku, P.E., Ilabor, A.C., Omeoga, C.A. (2013). "Kinetics of saponification of Treulia africana oil using a locally sourced alkaline", indica que como la cinética es pseudo-primer orden la constante de cinética aparente, tiene un valor de $k' = 0.0142 \text{ min}^{-1}$. Donde el grado de conversión de saponificación, x_A : 0.95.

Por tanto, el tiempo de la reacción de saponificación se calcula mediante la ecuación 2-25

$$t = \frac{1}{0,0142} * \frac{1}{(1 - 0,95)} = 1408,45 \text{ min} \cong 23,47 \text{ hr}$$

2.4.6.4 Cálculo de la velocidad de reacción en el proceso de saponificación

Teniendo un tiempo de reacción de 23.47 horas, por lo que para calcular la velocidad de reacción se encuentra la concentración del aceite al final de la reacción, mediante la ecuación 2-26.

$c_A = \frac{N_A}{V}$, donde se encuentra el valor de N_A a través de la ecuación 2-15

$x_A = \frac{N_{A0} - N_A}{N_{A0}}$, despejando N_A se obtiene:

$$N_A = N_{A0}(1 - x_A) \quad (\text{Ecuación 2-26})$$

Donde N_{A0} es el número de moles del aceite inicialmente, el mismo tiene un valor de 0,042 mol. Por lo tanto:

$$N_A = 0,042 * (1 - 0,95) = 0,0021 \text{ mol}$$

Por lo que la densidad del aceite de borra de café es 0,94g/ml (C.I.Q.-Anexo B) $\rho = \frac{m}{V}$, masa del aceite sobre volumen.

$$\text{Despejando el Volumen } V = \frac{m}{\rho} = \frac{36 \text{ g}}{0,94 \text{ g/ml}} = 38,29 \text{ ml} = 0,0383 \text{ l}$$

Obteniendo los valores de N_A y el volumen, se calcula la concentración del aceite al final de la reacción.

$$c_A = \frac{0,0021 \text{ mol}}{0,0383 \text{ l}} = 0,0548 \text{ mol/l}, \text{ concentración del aceite al final de la reacción.}$$

Reemplazando los valores de concentración c_A y la constante aparente se calcula la velocidad de la reacción a partir de la ecuación 2-11.

$$(-r_A) = k' * c_A = 0,0142 (\text{min}^{-1}) * 0,0548 \frac{\text{mol}}{\text{l}}$$

$$(-r_A) = 7,7816 * 10^{-4} \frac{\text{mol}}{\text{l} * \text{min}}, \text{ velocidad de reacción.}$$

Las condiciones de reacción que afectan en mayor medida a la saponificación son la temperatura y la concentración del catalizador. Por tanto, para aumentar el rendimiento de la misma, habrá que modificarlas para conseguir la conversión requerida. Temperaturas menores (25°C, T ambiente) reducen los costes de calefacción y disminuyen la cantidad de jabones formados por saponificación, promoviendo la transesterificación.

2.4.6.5 Cálculo de la entalpia de reacción

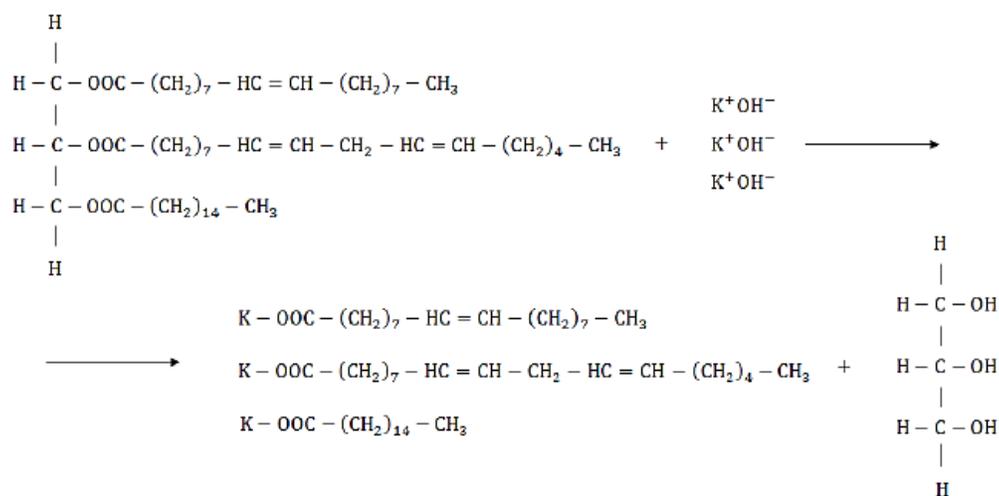
El cálculo de la entalpia de reacción se hace a partir de la energía de enlace de los componentes individuales de la reacción. Una reacción química consiste en un nuevo reagrupamiento de los átomos de los reactivos para formar los productos. Si se conocen las energías de estos enlaces, se pueden calcular fácilmente la entalpía de la reacción.

La energía de enlace es la energía necesaria para romper un mol de dichos enlaces. A partir de las energías medias de enlace pueden calcularse aproximadamente las entalpías de reacción entre sustancias. En efecto, teniendo en cuenta que para la ruptura de enlaces hay que suministrar energía, mientras que al formarse nuevos enlaces se desprende energía, se deduce que:

$$\Delta H = \sum (\text{Energía de enlaces rotos}) - \sum (\text{Energía de enlaces formados})$$

(Ecuación 2-27)

En el caso particular del presente proyecto, se utiliza un catalizador básico, el KOH, para que forme jabones mediante saponificación de los triglicéridos del aceite la reacción particular objeto de este estudio, se muestra en la figura 2-36.



Fuente: Planta de fabricación de jabón líquido, 2014

Figura 2-36 Reacción química de saponificación entre el triglicérido y la potasa

De las tablas de entalpías de enlace entre elementos que se muestran en la figura 2-37, se han tomado los valores de los enlaces que están presentes en la reacción de saponificación de los triglicéridos del aceite (tabla II-19) para el cálculo de la entalpía total.

Tabla II-23: Entalpias de enlace de varios enlaces entre elementos

Enlace	Energía de enlace ΔH (kJ/mol)	N° enlaces formados (reactivos)	N° enlaces rotos (productos)
C-H	415	100	100
C-C	347	46	48
C=C	610	3	3
C-O	352	6	6
C=O	743	3	3
O-H	460	3	3

Fuente: Elaboración propia, 2021

Para calcular la entalpía de la reacción tomamos la energía individual de los enlaces, consultando la tabla II-19, y aplicando la ecuación 2-27.

El valor que se obtiene es:

$$\Delta H = \sum (\text{Energía de enlaces rotos}) - \sum (\text{Energía de enlaces formados})$$

$$\Delta H = 46 - 48 = 2 * \Delta H_{C-C}$$

$$\Delta H = -2 * 347 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta H = -694 \text{ kJ/mol}$$

De forma neta se han formado dos enlaces C-C y del resto de enlaces se han roto y formado la misma cantidad.

2.4.6.6 Balance de energía en la etapa de saponificación

Los reactores discontinuos de mezcla perfecta son siempre isotermos; sin embargo, por simplificar la nomenclatura, se entenderá como reactor discontinuo isoterma aquel en el que la temperatura también se mantiene constante a lo largo del tiempo. El diseño de este tipo de reactor requiere la resolución simultánea de los balances de materia y energía.

De manera análoga al balance de materia, el balance de calor para un reactor discontinuo puede expresarse como:

$$\begin{aligned} & \text{Energía generada por reacción química} - \text{Energía desaparecida} \pm \\ & \text{Energía transmitida} = \text{Energía acumulada} \end{aligned} \quad (\text{Ecuación 2-28})$$

En la ecuación 2-28, el término de transmisión corresponde a la cantidad de calor aportada o retirada a través del área de intercambio disponible en el recipiente de reacción. Los términos de generación y desaparición corresponden al calor de reacción liberado, si la reacción es exotérmica como en nuestro caso.

El fluido caliente se mantiene en agitación con el fin de que la temperatura sea uniforme en toda la masa del líquido, con ello se pretende eliminar la existencia de un gradiente de temperaturas desde el seno del fluido hasta la cara interna del recipiente, con lo que se puede suponer que no hay resistencia a la transmisión de calor por convección ahí. En este caso sólo se tendría en cuenta por conducción.

A continuación, se aplica el balance de calor al reactor discontinuo isotérmico, en el cual la temperatura inicial, T_0 , se mantiene constante a lo largo del tiempo y el término de acumulación se anula. Esto significa que todo el calor que se libera durante la reacción tiene que ser transmitido a través de la pared de intercambio:

$$(-\Delta H_r) * (-r_A) * V = U * A_{TC} * (T_0 - T_{mf}) \quad (\text{Ecuación 2-29})$$

Con ayuda de las ecuaciones 2-14, y 2-29, obtenemos que:

$$(-\Delta H_r) * \left(-\frac{dN_A}{dt}\right) = U * A_{TC} * (T_0 - T_{mf}) \quad (\text{Ecuación 2-30})$$

De la ecuación 2-30 se despeja T_{mf} :

$$\begin{aligned} (T_0 - T_{mf}) &= \frac{(-\Delta H_r) * \left(-\frac{dN_A}{dt}\right)}{U * A_{TC}} \\ T_{mf} &= T_0 - \frac{(-\Delta H_r) * N_{A0}}{U * A_{TC}} * \frac{dx_A}{dt} \\ T_{mf} &= T_0 - \frac{(-\Delta H_r) * N_{A0}}{U * A_{TC}} * \frac{x_A}{t} \end{aligned} \quad (\text{Ecuación 2-31})$$

siendo,

T_{mf} : temperatura del fluido refrigerante ($^{\circ}\text{K}$).

T_0 = temperatura de reacción ($^{\circ}\text{K}$).

$(-\Delta H_r)$: entalpía de reacción (kJ/mol).

U : coeficiente global de transmisión de calor ($\text{W/m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{K}$).

A_{TC} : área de transmisión de calor (m^2).

x_A : conversión de la reacción (95%).

T : tiempo de reacción (3,46 h).

El calor total generado por la reacción química se expresa como:

$$Q = (-\Delta H_r) * N_{A0} * x_A \quad (\text{Ecuación 2-32})$$

Calculando cada término para tener el valor del calor generado por la reacción:

- El número de moles de aceite inicial, se calcula con la cantidad a emplear y su peso molecular: $N_{A0} = \frac{m}{PM} = 0,042 \text{ mol}$
- La entalpía de reacción química se ha calculado mediante la energía de enlace de los reactivos y productos; cuantificando la energía necesaria o desprendida al formar o romper los enlaces en la molécula: $(-\Delta H_r) = -694 \text{ kJ/mol}$
- La conversión se estableció en el 95% $x_A = 0,95$

Por tanto, con la ecuación 2-32 calculamos el calor generado durante la reacción química:

$$Q = -694 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} * 0,042 \text{ mol} * 0,95$$

$$Q = -27,69 \text{ kJ} = -6,618 \text{ kcal}, \text{ calor generado en la reacción química.}$$

2.4.7 Estimación de costos del consumo de energía en el proceso tecnológico experimental de obtención de jabón líquido a partir de la extracción de aceite de la borra de café

2.4.7.1 Costo del consumo de energía en el proceso de secado

Tomando en cuenta las condiciones de la estufa Conterm: Tiempo: 3 horas y una potencia: 2000 W. se calcula la energía de la estufa en el tiempo determinado de utilización en el proceso de secado de la borra de café.

$$Energia = Pot * t \quad (Ecuación 2-33)$$

$E = 2 kW * 3 hr = 6 kWh$, energía de la estufa en el tiempo de secado.

Para determinar el costo de la energía consumida por la estufa, durante el secado de la muestra, se multiplica la energía por el costo por kWh.

$$Costo = E * \frac{Costo}{kWh} \quad (Ecuación 2-34)$$

$Costo_{Secado} = 6kwh * \frac{0,94Bs}{kWh} = 5,64 bs$, es el costo en el proceso de secado.

2.4.7.2 Costo del consumo de energía en el proceso de molino de la borra de café

Las condiciones del molino de bolas para la borra de café seco fueron de un tiempo de 50 min = 0,833 horas cuya potencia del molino es: 250 W. Utilizando la ecuación 2-33 el cual refleja el cálculo de energía, se obtiene:

$E_{Molino} = 0,250 kW * 0,833 hr = 0,208 kWh$, energía del molino de bolas.

Para determinar el costo de la energía consumida por el molino de bolas, de la borra de café, se reemplaza la energía del molino en la ecuación 2-34.

$Costo_{molino} = 0,208kwh * \frac{0,94Bs}{kWh} = 0,1957 bs$, costo de consumo de energía en el molino.

2.4.7.3 Costo del consumo de energía en el proceso de extracción de aceite

Las condiciones del calentador eléctrico en el proceso de extracción fueron en un tiempo de 6 horas donde la potencia del calentador eléctrico fue de 1000 W. por lo que la energía se calcula con la ecuación 2-33.

$$E_{extracción} = 1 kW * 6 hr = 6 kWh, \text{energía del calentador en la extracción de aceite.}$$

Para determinar el costo de la energía consumida por el calentador eléctrico, durante el proceso de extracción, se multiplica la energía por el costo por kWh, en la ecuación 2-34.

$$Costo_{ext.} = 6kwh * \frac{0,94Bs}{kWh} = 5,64 bs, \text{costo de consumo de energía en el proceso de extracción del aceite.}$$

2.4.7.4 Costo del consumo de energía en el proceso de destilación de la mezcla solvente-aceite

Las condiciones del calentador es la misma que en el proceso de extracción, pero el tiempo de recuperación del solvente presente en la mezcla de aceite más solvente fue de 2,33 hr. Por lo que la energía es:

$$E = 1 kW * 2hr = 2 kWh, \text{energía del calentador en el proceso de destilación.}$$

El costo de la energía consumida por el calentador eléctrico, durante el proceso de recuperación del solvente es:

$$Costo_{Dest} = 2kwh * \frac{0,94Bs}{kWh} = 1,88 bs$$

2.4.7.5 Costo del consumo de energía en el proceso de descarte del solvente en la borra extraída

Para el descarte del solvente en la borra húmeda se realizó en la estufa Conterm por un tiempo total de 5,5 horas, cuya potencia es la misma en el proceso de secado de la borra de café.

$E = 2 \text{ kW} * 5,5 \text{ hr} = 11 \text{ kWh}$, energía consumida en la evaporación del solvente presente en la borra extraída húmeda.

Determinando el costo de la energía consumida:

$Costo_{desl B} = E * \frac{Costo}{kWh} = 11 \text{ kWh} * \frac{0,94Bs}{kWh} = 10,34 \text{ bs}$, costo del proceso de descarte del solvente en la borra extraída húmeda.

2.4.7.6 Costo del consumo de energía en el proceso de descarte del solvente en el producto

El tiempo de descarte del solvente en el aceite fue de 1,5 horas, obteniendo:

$E = 2 \text{ kW} * 1,5 \text{ hr} = 3 \text{ kWh}$, energía consumida en el proceso de desolventización del aceite.

$$Costo_{Desl.prod} = E * \frac{Costo}{kWh} = 3 \text{ kWh} * \frac{0,94Bs}{kWh} = 2,82 \text{ bs}$$

Donde el costo del consumo de energía en el proceso de eliminación de trazas de solvente en el aceite es de 2,82 bolivianos.

2.4.7.7 Costo del consumo de energía en el proceso de saponificación

En el proceso de saponificación se realizó en un reactor montado, por medio de un baño maría cuya fuente de calor es un calentador eléctrico cuya potencia es de 1000 W. El tiempo de reacción fue de 23,47 horas. Por tanto, la energía consumida es:

$E = 1 \text{ kW} * 23,47 \text{ hr} = 23,47 \text{ kWh}$, en el proceso de saponificación. Y el costo:

$Costo_{saponificación} = E * \frac{Costo}{kWh} = 23,47 \text{ kWh} * \frac{0,94Bs}{kWh} = 22,06 \text{ bs}$, consto del consumo energético durante el tiempo de reacción.

2.4.7.8 Costo del consumo total de energía en la obtención de jabón líquido a partir de la extracción de aceite de la borra de café

El costo total del proceso de obtención de jabón líquido referente al consumo de energía de los equipos utilizados en cada etapa del mismo, es igual a la suma algebraica de cada uno:

$$\text{Costo total} = \sum \text{procesos}$$

$$\begin{aligned} \text{Costo total} = & \text{Costo}_{\text{saponificación}} + \text{Costo}_{\text{Desl.prod}} + \text{Costo}_{\text{desl B}} + \text{Costo}_{\text{Dest}} \\ & + \text{Costo}_{\text{ext.}} + \text{Costo}_{\text{molino}} + \text{Costo}_{\text{Secado}} \end{aligned}$$

$$\text{Costo total} = 22,06 + 2,82 + 10,34 + 1,88 + 5,64 + 0,195 + 5,64 = \mathbf{48,58 \text{ bs}}$$

El costo total de energía para obtener jabón líquido a partir de la extracción de aceite de la borra de café es de 48,58 bolivianos.

CAPÍTULO III
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados de los análisis fisicoquímicos de la borra de café

Los resultados de los análisis fisicoquímicos realizados de la borra de café ideal de variedad arábica presentan los siguientes resultados, los mismos fueron realizados en el centro de análisis, investigación y desarrollo “CEANID”

Tabla III-1: Comparación de datos fisicoquímicos de la borra de café

Parámetros	Técnica y/o método de ensayo	Resultados de Ceanid	Resultado de bibliografía
Ceniza	NB 39034:10	0,58 %	0,8 – 0,6 %
Densidad	NB 230:99	1,05 g/ml	0,28 gr/cc
Fibra	Gravimétrico	5,43 %	5,43
Grasa	NB 313019:06	5,58 %	10 – 15%
Hidratos de Carbono	Calculo	31,28 %	34 – 39%
Humedad	NB 313010:05	57,13 %	10 – 5%
Proteína Total	NB/ISO 8968-1:08	n. d. %	14 – 15%
Valor energético	Calculo	175,34 Kcal/100 g	
NB: Norma Boliviana		Kcal: Kilocalorías	n.d. No detectable
ISO: Organización Internacional de Normalización		g/ml: gramos por mililitros	%: porcentaje

Fuente: Elaboración Propia, 2021

En la tabla III-1 se observa diferentes resultados de acuerdo a los parámetros que se analizaron, donde la materia prima que se analizó en el centro de análisis, investigación y desarrollo CEANID, fueron en un estado húmedo ya que así se planteó desde el principio del proyecto en uno de los objetivos específicos, dándose a conocer que la materia prima sería recolectada en diferentes puestos de cafeterías utilizándose una sola variedad de café (borra de café).

Donde la humedad de acuerdo a CEANID, la borra de café presenta un porcentaje de humedad del 57,13%, el mismo fue comparado en un analizador de humedad electrónica obteniéndose un resultado del 55,66 %, donde el margen de error es del 1,47%.

Estos resultados que se realizaron no pueden ser comparados con los de bibliografía ya que los mismos fueron realizados una vez que la borra de café ya se encontraba seca.

Donde de acuerdo a los resultados de bibliografía fue una guía para poder trabajar en cuanto al porcentaje de humedad que debía presentar para continuar con el proceso de molino y extracción de aceite.

3.2 Resultados de los análisis fisicoquímicos del aceite extraído de borra de café

Los parámetros fisicoquímicos determinados para el aceite de borra de café, fueron analizados en el laboratorio del Centro de Investigaciones Químicas CIQ – Cochabamba. Los análisis del aceite de Borra de café de variedad arábica proveniente de las cafeterías Alder, en la ciudad de Tarija, fueron los siguientes:

- Determinación de la densidad.
- Determinación de pH
- Determinación porcentual de humedad.
- Determinación de Viscosidad dinámica
- Determinación del punto de fusión.
- Determinación del índice de saponificación.
- Determinación de peróxido
- Determinación del índice de acidez.
- Determinación del índice de yodo.

Tabla III-2: Características físicas y químicas del aceite extraído de la borra de café

Parámetro	Unidad	Método de Ensayos	Resultado
Densidad.	g/ml	Picnómetro	0,94
pH	Adimensional	Potenciométrico	4,33
Humedad.	g/100 g	Gravimétrico	2,73
Viscosidad dinámica	Ct	Viscosímetro	117,78
Punto de fusión.	°C	Thiele	16
Índice de saponificación.	mg KOH/ g	Titulación	182,76
Índice de acidez.	% Ácido Oleico	Titulación	6
Índice de peróxido	meqO ₂ /Kg	Titulación	0,79
Índice de yodo.	%	Titulación	95

Fuente: Centro de Investigaciones Químicas S.R.L, 2021. Quillacollo-Bolivia.

3.2.1 Comparación de los resultados de los análisis fisicoquímicos del aceite de la borra de café

Las características fisicoquímicas del aceite extraído de la borra de café obtenida en la parte experimental del presente proyecto de investigación y las que se encuentran como referencia bibliográfica, se comparan a continuación en la Tabla III-3.

Tabla III-3: Comparación del aceite extraído de la borra de café

Parámetro/Unidad	Resultado Experimental	Datos Bibliográficos
Densidad (g/ml)	0,94	0,923
pH	4,33	4,58
Humedad (g/100 g)	2,73	-
Viscosidad dinámica (Pa/s)	0,11778	0,1
Punto de fusión (°C)	16	15
Índice de saponificación (mg KOH/ g)	182,76	180,6
Índice de acidez (% Ácido Oleico)	6	5,2
Índice de peróxido (meqO ₂ /Kg)	0,79	0,27
Índice de yodo (%)	95	97,6

Fuente: Centro de Investigaciones Químicas S.R.L., 2021.

Al comparar los datos bibliográficos con los obtenidos experimentalmente, se puede apreciar que las características fisicoquímicas del aceite obtenido mediante extracción por solvente (Etanol) a partir de la Borra de Café, tales como la densidad, pH, punto de fusión, índice de saponificación, y el índice de yodo, se encuentran con datos similares. No obstante, el parámetro del índice de acidez es mayor al dato bibliográfico, indicando que se requerirán mayor cantidad de miligramos de hidróxido de potasio necesario para neutralizar los ácidos de grasos libres presentes en cada gramo de aceite. Otro parámetro es el índice de peróxidos, con un 0,79 meqO₂/kg, indicando el estado de oxidación inicial del aceite es mucho mayor al dato de bibliografía. Por último, el extremadamente alto índice de yodo señala un alto grado de instauración, lo cual se comprueba en los resultados del perfil cromatográfico realizado al aceite de Borra de Café, donde se observa un alto porcentaje de ácidos grasos insaturados.

3.2.2 Resultado del proceso de extracción de aceite de la borra de café

La Tabla III-4 vista en el capítulo anterior, indica los resultados experimentales obtenidos en el proceso de extracción de aceite a partir de la borra de café, donde se observa la evidente influencia de los parámetros, relación soluto/solvente y tiempo de extracción sobre el rendimiento del Aceite. Siendo el más alto, 9,38 %.

Tabla III-4: Datos experimentales del proceso de extracción de aceite de borra de café

Factores		Respuesta I		Respuesta II	
Relación soluto/solvente (gr/l)	Tiempo (hr)	Aceite (g)	Aceite (%)	Aceite (g)	Aceite (%)
A (340/2000)	4	16,83	4,95	15,91	4,68
B (380/2000)	4	26,18	6,89	25,50	6,71
A (340/2000)	6	24,92	7,33	22,51	6,62
B (380/2000)	6	35,67	9,38	33,73	8,87

Fuente: Elaboración propia, 2021

3.2.3 Análisis estadístico del diseño factorial realizado en el proceso de extracción

El programa utilizado en la presente investigación, para desarrollar el análisis estadístico del diseño experimental, fue el SPSS 26.0 (Statistical Package for the Social Sciences) para Windows, mismo que permite el tratamiento integrado de todas las fases que conlleva el análisis de datos, recabándose resultados más representativos y confiables.

Los resultados obtenidos de cada combinación relación soluto/solvente-tiempo de extracción “Relación s/S-Tiempo”, favorecieron el diseño experimental permitiendo la determinación de las variables más significativas para el proceso de extracción.

La variable respuesta de los datos experimentales, puede ser expresada mediante la masa de aceite de borra de café obtenida o del rendimiento del aceite (expresado en porcentaje). Para fines de análisis estadístico, se tomó el porcentaje de aceite de borra de Café obtenida como variable respuesta, por ser el parámetro que indica de forma clara y directa el rendimiento del proceso y la cantidad de aceite producida.

A continuación, se presentan (Tabla III-5), muestran los resultados obtenidos de forma experimental dentro del proceso de extracción de aceite de borra de café, efectuados según el diseño factorial elaborado para el caso.

Tabla III-5: Datos experimentales del proceso de extracción de aceite de la borra de café

N° Exp	Factores		Respuesta I		Respuesta II	
	Relación soluto/solvente	Tiempo (h)	Aceite (gr)	Rendimiento (%)	Aceite (gr)	Rendimiento (%)
1	-	-	16,838	4,952	15,87	4,68
2	+	-	26,217	6,899	25,51	6,71
3	-	+	24,97	7,33	22,493	6,62
4	+	+	35,677	9,38	33,735	8,87

Fuente: Elaboración propia, 2021

El Aceite de Borra de Café se obtuvo en el proceso de extracción, empleando tres relaciones soluto/solventes diferentes, siendo la variable A, la relación que contiene menor cantidad de Borra de Café (soluto) y B, la relación con mayor cantidad de Borra de Café; combinando las dos relaciones con los distintos tiempos de extracción, 4 y 6 horas. Se obtuvo el mayor porcentaje de Aceite trabajando con la relación soluto/solvente con mayor cantidad de borra de café y con el mayor tiempo de extracción, siendo dicho rendimiento del 9,38%.

3.2.3.1 Análisis de Varianza para regresión lineal en el proceso de extracción

En resumen, el ANOVA indica las variables principales que influyen en el proceso de extracción, es decir, sobre la variable respuesta (rendimiento). Del mismo modo se dan las transformaciones sobre las interacciones entre las variables independientes que influyen en la variable dependiente, y la significancia de las mismas. En la tabla III-6 se exponen los datos con los cuales se ha realizado el cálculo de análisis de varianza de un diseño 2^2 .

Tabla III-6: Datos para el cálculo del análisis de varianza

Relación soluto/solvente	Tiempo	Rendimiento
-1,00	-1,00	4,95
1,00	-1,00	6,89
-1,00	1,00	7,33
1,00	1,00	9,38
-1,00	-1,00	4,68
1,00	-1,00	6,71
-1,00	1,00	6,62
1,00	1,00	8,87

Fuente: Elaboración propia, 2021

El análisis de varianza (tabla III-7), nos resume la variabilidad de las observaciones en el experimento. La variación correspondiente a los tratamientos que explica la variabilidad entre las medias de los tratamientos, y la correspondida al error.

Tabla III-7: Análisis de varianza en el proceso de extracción de aceite

Origen	suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	14,458	3	4,819	44,340	0,002
Intersección	369,784	1	369,784	3402,268	0,000
Relación s/S	6,534	1	6,534	60,118	0,001
Tiempo	7,861	1	7,861	72,323	0,001
Relación * Tiempo	0,063	1	0,063	0,580	0,489
Error	0,435	4	0,109		
Total	384,677	8			
Total, corregido	14,892	7			

Fuente: Elaboración propia, 2021

Las variables más significativas son las que poseen una significancia menor al 5% (0,05), con una probabilidad de 95%.

La variable de interacción relación soluto/solvente*tiempo tiene una significancia de 0,489 quedando descartada, porque no cumplen con el requisito del valor menor a 0,05.

Según el análisis de varianza, se puede verificar que a un nivel de significancia 5 %, las variables relación soluto/solvente y tiempo, cumplen con el requisito (menor al 0,05).

3.2.3.2 Análisis de regresión lineal en el proceso de extracción

Establecido lo anterior, se procede a realizar la regresión lineal a fin de establecer el modelo matemático. En la tabla III-8, se muestran los resultados de la regresión.

Tabla III-8: Coeficientes del modelo

Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.	
	B	Error	Beta			
1	(Constante)	6,799	0,112		60,946	0,000
	Relación s/S	0,904	0,112	0,662	8,102	0,000
	Tiempo	0,991	0,112	0,727	8,886	0,000

Fuente: Elaboración propia, 2021

De los datos indicados en la Tabla III-8 se determinó que el modelo matemático ajustado para el proceso de extracción, que correlaciona el porcentaje de aceite de borra de café obtenida con las variables, Relación s/S y Tiempo de extracción, para el caso analizado es el siguiente:

$$Rendimiento = 6,799 + 0,904 * R\left(\frac{soluto}{Solvente}\right) + 0,991 * T(tiempo)$$

Por consiguiente, el rendimiento está en función de la relación soluto/solvente y el tiempo de extracción, siendo estos de signo positivo, es decir que mientras mayor cantidad de borra de café (soluta en la relación soluto/solvente) y mayor tiempo de extracción, se obtiene mayor cantidad de aceite, mayor rendimiento.

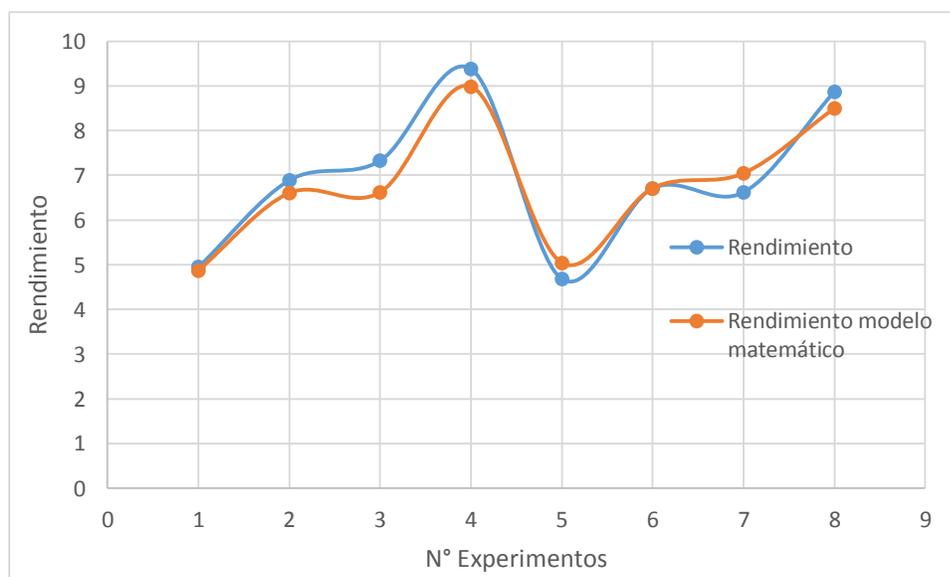
En la tabla III-9, se muestra la comparación de los resultados del rendimiento respecto al porcentaje de aceite de borra de café obtenido de manera experimental y el obtenido a través del modelo matemático.

Tabla III-9: Resultados del Rendimiento observado y obtenido con el modelo matemático

Relación s/S	Tiempo	Rendimiento	Rendimiento modelo matemático
-1,00	-1,00	4,95	4,876
1,00	-1,00	6,89	6,604
-1,00	1,00	7,33	6,620
1,00	1,00	9,38	8,990
-1,00	-1,00	4,68	5,038
1,00	-1,00	6,71	6,712
-1,00	1,00	6,62	7,046
1,00	1,00	8,87	8,501

Fuente: Elaboración propia, 2021

Analizando la figura 3-1, se observa la curva del rendimiento de los 8 experimentos obtenidos de forma experimental y los resultados obtenidos de forma matemática.



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 3-1 Rendimiento observado vs obtenido con el modelo matemático

En resumen, del análisis estadístico del diseño experimental se concluye en:

El modelo elegido es correcto, en consideración a la variable dependiente y las variables independientes son significativas para un nivel de confianza de 95 %.

El factor que más afecta en el proceso de extracción, es el tiempo de extracción siguiéndole en importancia la relación soluto/solvente, ligado el uno del otro. Porque,

el tiempo de extracción influye directamente sobre la cantidad de aceite extraída y si la cantidad de soluto es alta, el gradiente de concentración también es alto y el proceso de extracción es rápido. Por consiguiente, se debe tener especial cuidado en el manejo de estas variables en el proceso productivo industrial.

3.3 Resultados de los análisis fisicoquímicos del jabón líquido

Los parámetros fisicoquímicos determinados para el jabón líquido, fueron analizados en el laboratorio de centro de análisis investigación y desarrollo “CEANID”. Los análisis del jabón líquido de aceite de borra de café, fueron los siguientes:

- Alcalinidad libre:
- Materia insoluble en agua:
- pH:

A continuación, se muestra la tabla III-10 los resultados de los parámetros del jabón líquido:

Tabla III-10: Resultados fisicoquímicos del jabón líquido

Resultado de los parámetros				
Parámetro	Alcalinidad libre (como NaOH) %	Materia insoluble en agua %	pH (20°C)	
Límites (máx.)	0,5	1,5	11	
Método de Ensayo	NTE INEN 821	NTE INEN 816	NTE INEN-ISO 4316	
Muestra	Muestra 1	0,44	1,5	9,94
	Muestra 2	0,23	1,08	10,04
	Muestra 3	0,21	0,02	11,88
	Muestra 4	0,25	0,41	12,11
Referencia de los Límites	NTE INEN 842:07	NTE INEN 842:07	NTE INEN 842:07	

Fuente: Elaboración propia, 2022

Los resultados de los análisis fisicoquímicos de jabón líquido, presentan resultados favorables en las muestras 1 y 2, ya que se encuentran bajo los límites máximos de acuerdo a las normas, con un exceso del 10% de KOH. Pero no así en las muestras 3 y 4 ya que presentan un pH alto fuera de norma, indicando que la concentración de iones hidróxido (OH^-) es tan alta que se necesita una cantidad significativa de ácido para neutralizar suficiente cantidad de ellos antes que el pH caiga. Esto es debido a uno de

los niveles de exceso de hidróxido de potasio planteado en el diseño factorial del jabón líquido indicando un exceso del 15%. El cual si bien presenta una mejor reacción de saponificación también requiere de mayor volumen de ácido para neutralizar ya que el 6% de peso de la pasta jabonosa alimentado no redujo el pH como así se reflejaba en las tiras reactivas de pH.

3.3.1 Análisis estadístico del diseño factorial realizado en el proceso de saponificación

El diseño factorial se realiza con el propósito de establecer si los factores de agitación y exceso de hidróxido de potasio tienen influencia en la pasta de jabón obtenido, en la etapa de saponificación, cuya temperatura se mantiene a 80°C. En este sentido se selecciona un diseño 2² es decir, dos factores en dos niveles.

En la tabla III-11, se muestra los datos introducidos al programa de acuerdo al diseño factorial planteado.

Tabla III-11: Datos introducidos para el análisis de varianza en el proceso de saponificación

Muestra	Agitación	% exceso KOH	Pasta jabonosa (gramos)
1	-1	-1	40,08
2	1	-1	46,19
3	-1	1	49,30
4	1	1	52,40
5	-1	-1	38,00
6	1	-1	46,35
7	-1	1	50,30
8	1	1	55,10

Fuente: Elaboración propia, 2022

3.3.1.1 Análisis de Varianza para regresión lineal en el proceso de saponificación

Para obtener un resultado significativo se debe tomar en cuenta los factores y sus interacciones entre sí, que tenga un valor menor a 0,05 (lo que significa un nivel de probabilidad del 95%).

En la tabla III-12, se puede observar el análisis de varianza para la variable dependiente o variable respuesta, pasta jabonosa, tomando en cuenta los factores % exceso de KOH y agitación, así como su interacción.

Tabla III-12: Análisis de varianza en el proceso de saponificación

Origen	Suma de cuadrados tipo III	Grados de libertad	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	234,224	3	78,075	49,407	0,001
Intersección	17834,050	1	17834,050	11285,588	0,000
Agitación	62,496	1	62,496	39,548	0,003
% exc. KOH	166,349	1	166,349	105,267	0,001
Agitación * % exc. KOH	5,379	1	5,379	3,404	0,139
Error	6,321	4	1,580		
Total	18074,595	8			
Total corregida	240,545	7			

Fuente: Elaboración propia, 2022

Se puede observar, que cumplen el requisito las dos variables, descartándose la interacción entre factores.

3.3.1.2 Análisis de regresión lineal en el proceso de saponificación

El modelo de regresión establece el modelo matemático que relaciona las variables más significativas con la variable respuesta.

La tabla III-13, muestra los valores de los coeficientes del modelo en el proceso de saponificación.

Tabla III-13: Coeficientes del modelo en el proceso de saponificación

Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados	t	Sig.	
	B	Error	Beta			
1	(Constante)	47,215	0,541		87,300	0,000
	Agitación	2,795	0,541	0,510	5,168	0,004
	% exc. KOH	4,560	0,541	0,832	8,431	0,000

Fuente: Elaboración propia, 2022

De los datos indicados en la tabla III-13, se determinó que el modelo matemático ajustado para el proceso de saponificación, correlaciona con la pasta jabonosa obtenido con las variables, agitación y porcentaje de exceso de hidróxido de sodio, el caso analizado es el siguiente:

$$\text{Pasta jabonosa} = 47,215 + 2,795 * (\text{Agitación}) + 4,56 * (\% \text{ exc KOH}).$$

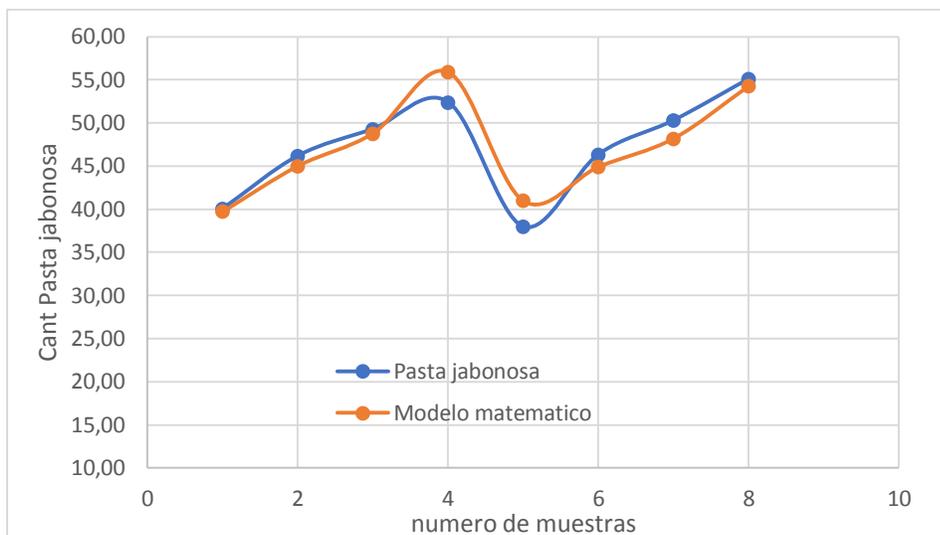
En la tabla III-14, se muestra la comparación de los resultados de la cantidad de pasta jabonosa obtenido de manera experimental y el obtenido a través del modelo matemático.

Tabla III-14: Resultados de la cantidad de pasta jabonosa obtenida experimental y el modelo matemático

Muestra	Agitación	% exceso KOH	Pasta jabonosa (g)	Modelo matemático
1	-1	-1	40,08	39,73
2	1	-1	46,19	45,01
3	-1	1	49,30	48,79
4	1	1	52,40	55,87
5	-1	-1	38,00	40,98
6	1	-1	46,35	44,91
7	-1	1	50,30	48,19
8	1	1	55,10	54,25

Fuente: Elaboración propia, 2022

Analizando la figura 3-2, se observa la curva de la pasta jabonosa de los 8 experimentos obtenidos de forma experimental y los resultados obtenidos con el modelo matemático.



Fuente: Elaboración propia, 2022

Figura 3-2 Cantidad de pasta jabonosa experimental vs el modelo matemático

Donde las muestras 1, 2 y 3 cuentan con resultados cercanos al modelo matemático. Las muestras 4 y 5 tienen una relevante diferencia entre los resultados observados y los calculados

3.3.2 Control de calidad del Jabón líquido

Los parámetros a utilizar para efectuar el respectivo control de calidad del producto obtenido, se mencionan los parámetros junto con su definición, los cuales fueron replicados por (Leyva & Torres, 2016) y (Córdova, Navarro, Pardo, Soto, & Távara, 2018).

3.3.2.1 Prueba del hilo

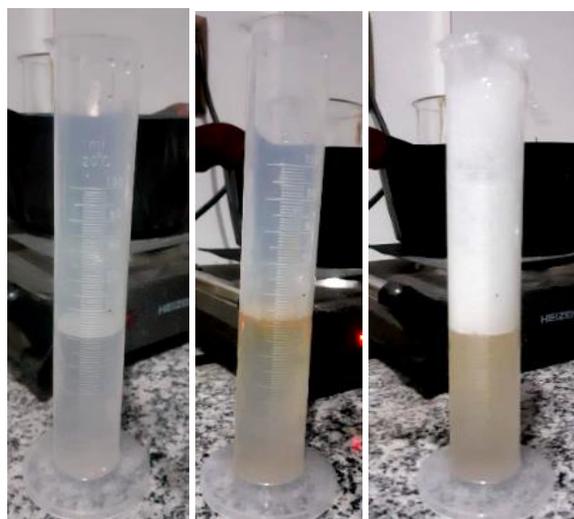
Esta prueba es de tipo cualitativa, da un indicativo preliminar del jabón líquido en relación al porcentaje de agua y pasta jabonosa. Se realizó la prueba de hilo para asegurar la textura correcta del jabón líquido. Consistió en dejar caer el jabón líquido desde una altura aproximada de 30 cm y observar la fluidez que presentaba cada una de las diluciones.



Fuente: Elaboración propia, 2022
Figura 3-3 Prueba del hilo

3.3.2.2 Prueba de persistencia espuma

La prueba de persistencia de espuma es realizada en una probeta graduada, agregando 50 ml de agua destilada, posterior 1 g del jabón líquido, misma fue cubierta para evitar filtraciones, agitando 30 veces. Se realizó lectura del volumen, la altura inicial de la espuma y el tiempo que demora en disiparse.



Fuente: Elaboración propia, 2022
Figura 3-4 Prueba de espuma

3.3.2.3 Prueba de saponificación

Para comprobar que la reacción de saponificación se llevó a cabo completamente, se disuelven 1,25 gramos del jabón en 50 ml agua caliente (no hirviendo), no se mezcla

ni se agita y se espera unos minutos a que se formen las gotas de grasa. Lo deseable es que se obtenga una mezcla clara y sin gotas de grasa.



Fuente: Elaboración propia, 2022

Figura 3-5 Prueba de saponificación

CAPÍTULO IV
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

Basados en los resultados obtenidos, se puede responder a los objetivos planteados en el presente proyecto de investigación con las siguientes conclusiones:

- Se logró obtener experimentalmente jabón líquido a partir de la extracción de aceite de la borra de café. La materia prima se logró recolectar de la variedad de café arábica, obtenida de cafeterías. La misma fue caracterizada las propiedades físicas y químicas obteniéndose resultados de contenido de grasa de 5,58% indicando el contenido de grasa o aceite presente en la borra de café, posterior otro punto importante es el contenido de humedad presente en la que se encuentra una vez agotado su bebida estimulante (café), el cual debe de reducirse hasta una humedad menor al 5% para mejorar la extracción de aceite. Contiene un 0,558% de ceniza informando un contenido mínimo de impurezas y por último presenta un valor energético de 175,34 kcal/100g indicando así la cantidad de energía necesaria para la fabricación del aceite de borra de café.
- Se analizó el proceso tecnológico experimental a través de una matriz decisión y se optó por trabajar por un proceso de extracción sólido-líquido Soxhlet, para la extracción de aceite de borra de café, trabajándose con etanol al 96% como solvente y a una temperatura de los 72,3°C. Así también se planteó los parámetros de relación soluto/solvente y tiempo en los que se realizaron los experimentos obteniéndose como variable respuesta el rendimiento.
- Se realizó la ejecución de la fase experimental del proceso tecnológico de obtención de jabón líquido a partir de la extracción de aceite de la borra de café, donde se procedió a secar la materia prima a una temperatura de 105°C durante un tiempo de 3 horas hasta alcanzar un porcentaje de humedad menor al 5% lo cual este se logró comprobar con un analizador de humedad cuyo equipo se encuentra en el laboratorio de operaciones unitarias, donde una vez secada la materia prima fue desmenuzada en un molino de bolas durante 50 min con la finalidad que el solvente pueda penetrarse mejor con el soluto y pueda extraer el aceite. Este método fue comprobado ya que se realizó pruebas, donde a menor diámetro de la partícula

mayor extracción de aceite, posterior la extracción de aceite es realizada en un extractor de Soxhlet donde mayor cantidad de soluto y tiempo mayor es el rendimiento. Dando a concluir que se necesitan 904,590 gramos de borra de café húmeda para obtener 35,677 g de aceite dando un rendimiento de 9,38%. Donde obteniéndose el aceite se realiza el proceso de saponificación, reacción entre el aceite y la solución de hidróxido de potasio que la misma está basada en el índice de saponificación del aceite de borra de café, dando como resultado 182,76 mg KOH/gr indicando que se requieren de 182,76 mg de hidróxido de potasio necesarios para saponificar un gramo de aceite, misma se introduce ácido bórico para neutralizar el exceso de álcali presente en la solución y se debe diluir en agua destilada.

- El rendimiento de la extracción de aceite de borra de café obtenido, fue sometido a un tratamiento integrado de todas las fases que conlleva el análisis de datos, recabándose resultados más representativos y confiables.
- De los datos indicados en la Tabla III-8 se determinó que el modelo matemático ajustado para el proceso de extracción, que correlaciona el porcentaje de aceite de borra de café obtenida con las variables, Relación s/S y Tiempo de extracción, para el caso analizado es el siguiente: $Rendimiento = 6,799 + 0,904 * \frac{RS}{S} + 0,991 * T$ Por consiguiente, el rendimiento está en función de la relación soluto/solvente y el tiempo de extracción, siendo estos de signo positivo, es decir que mientras mayor cantidad de Borra de Café (soluto en la relación soluto/solvente) y mayor tiempo de extracción, se obtiene mayor cantidad de aceite, mayor rendimiento.
- Se logró obtener de 36 g de aceite una cantidad de pasta jabonosa de 46,19 g, misma que una porción fue sometida a diferentes disoluciones hasta lograr los estándares de calidad, para posterior diluir la pasta de jabón con agua destilada.
- Se logró calcular el tiempo de reacción entre el álcali y aceite dando 23,47 horas, tiempo total de saponificación de la pasta jabonosa para posterior ser diluida. Con una velocidad de reacción de $7,78 * 10^{-4}$ mol/l*min, donde las condiciones que afectan en mayor medida a la saponificación son la temperatura misma que se

mantenido a 80°C. Generando un calor exotérmico total por la reacción química de – 6,618 kcal.

- Los análisis físico-químicos de los jabones, realizados por CEANID, muestran que todos los experimentos están por debajo del límite de la norma INEN 842 para el % materia insoluble en agua y alcalinidad libre, observando el pH de la muestra 3 y 4 no cumplen con la norma, debido al exceso de 15% KOH planteado en el diseño factorial, donde requiere de más ácido bórico para neutralizar el excedente de álcali.
- La norma de calidad del jabón líquido para que pase de la etapa de reacción a mezclado es la prueba de ácidos grasos, misma no deberá presentar turbidez jabonosa, para dar por terminada la cocción caso contrario debe continuarse con el proceso del mismo, hasta presentar una dilución clara y traslucida a la luz indicando que los ácidos grasos presentes fueron neutralizados y posterior pasar a la siguiente etapa. Para la última etapa se realizó pruebas de disolución de la pasta jabonosa con agua destilada con diferentes proporciones, hasta encontrar una proporción adecuada mediante la prueba del hilo y la prueba de espuma persistente.

4.2. Recomendaciones

- Se recomienda que la borra de café húmeda debe de ser tratada en su debido momento evitando el crecimiento de mohos y microorganismos.
- El tiempo de secado no debe exceder las 4 horas ni tampoco la temperatura de 105°C, debido a que se desprende el contenido aceite presente en las partículas pequeñas de borra, misma que debe ser molida para obtener mayor rendimiento. La borra de café secada debe asegurarse y cerrarse totalmente en los cartuchos de papel filtro evitando la fuga de pequeñas partículas de borra las mismas suelen contaminar y mezclarse con la mezcla de solvente más aceite.
- Se recomienda utilizar para la destilación simple, un equipo de rota evaporador, ya que al realizar el proceso destilación simple para la recuperación del solvente, este al contener aceite denso suele tener pérdidas por penetración y calentamiento en el balón. Mismo se adicionó en el calentador una malla de amianto, generando mayor tiempo de recuperación del solvente.
- Es recomendable descartar el solvente de la borra de café extraída de aceite debido a que contiene azúcares, polisacáridos, minerales y proteínas, que le confieren un alto valor biotecnológico, que puede ser aprovechado en procesos fermentativos, y también puede utilizarse como combustible sólido aplicando calcinación o como fertilizante para las plantas.
- Es recomendable usar equipos de medición de pH, para evitar malas indicaciones erróneas por el papel tornasol de pH.