

**EVALUACIÓN DE LOS FACTORES QUE INFLUYEN EN LA PÉRDIDA DE  
ACEITE DE PALMA AFRICANA DURANTE LAS OPERACIONES DE  
ESTERILIZACIÓN Y CLARIFICACIÓN EN LA PLANTA EXTRACTORA DE  
INDUPALMA LTDA.**

**LIZETH XIMENA FLÓREZ DELGADO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS  
INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2014**

**EVALUACIÓN DE LOS FACTORES QUE INFLUYEN EN LA PÉRDIDA DE  
ACEITE DE PALMA AFRICANA DURANTE LAS OPERACIONES DE  
ESTERILIZACIÓN Y CLARIFICACIÓN EN LA PLANTA EXTRACTORA DE  
INDUPALMA LTDA.**

**LIZETH XIMENA FLÓREZ DELGADO**

**Trabajo de grado en modalidad práctica empresarial para optar al Título  
de Ingeniera Química.**

**Director:**

**LUIS ENRIQUE FUENTES PERÉA**

**Ing. Químico**

**Co-Director:**

**Esp. WILMAR HERNÁN ALARCÓN**

**Ing. de Procesos**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS  
INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2014**

## DEDICATORIA

*Al Señor Todopoderoso, mi primer y más grande amor, por darme energía, salud, sabiduría y coraje para hacer este sueño realidad, por ser mi constante amigo, mi divino Padre y por enseñarme cada día que la fe es ver lo posible en lo imposible. ¡Que toda la gloria sea para Dios!*

*A mi bella Madre, una hermosa mujer llena de interminables valores y actitud positiva, quien siempre estuvo ahí apoyándome, me sirvió de ejemplo y me llevó paciente de su mano por el camino del éxito.*

*A mi Padre, un elegante señor que nunca se cansó de luchar por verme feliz en la cúspide de lo inalcanzable. Su ejemplo de perseverancia y laboriosidad se convirtieron en mis fuertes bases para enfrentar con tenacidad el mundo de hoy.*

*A Carlos y Nanito, mis dos grandes hermanos y amigos de sangre para toda la vida.*

*A mi novio, Libardo Duarte por su apoyo y amor y porque gracias a su incondicionalidad he podido vivir grandes experiencias de vida.*

*A todos mis queridos familiares. A mis pocos pero grandes amigas y amigos del alma, que ellos saben bien quienes son.*

*... Este triunfo es por ustedes y para todos ustedes. Gracias!*

## AGRADECIMIENTOS

Expreso mis más sinceros agradecimientos,

A la Universidad Industrial de Santander por su mágica omnisciencia y en especial a todo el cuerpo de docentes de la Escuela de Ingeniería Química por instruirme cada día en conocimiento, cultura, disciplina, constancia y excelencia.

Al Ingeniero Wilmar Hernán Alarcón, por tenerme en cuenta para formar parte de su valioso equipo de trabajo, por toda su colaboración, paciencia y amabilidad. A la Ingeniera Luisa Fernanda España y a todo su grupo laboral de la Unidad Industrial. También a Indupalma Ltda., por convertirse en mi segunda escuela.

Al Ingeniero Luis Enrique Fuentes Peréa por manifestar un amplio interés en guiar mi trabajo desde el comienzo, por su paciencia, comprensión y por dirigirme de la manera más acertada en este arduo e interesante camino de la ciencia.

A Nidia Elizabeth Ramírez Contreras, profesional en Química de Alimentos y Asistente de Investigación en Cenipalma, por todos sus valiosos aportes a mis ideas iniciales.

A todos los analistas del Laboratorio Industrial y al personal operario y administrativo de la empresa Indupalma Ltda., por entregar su empeño, conocimiento y buena disposición a todas y cada una de las actividades que se necesitaron para la realización exitosa de este proyecto.

... “Soy de las que piensan que la ciencia tiene una gran belleza. Un científico en su laboratorio no es sólo un técnico: es también un niño colocado ante fenómenos naturales que lo encandilan como un cuento de hadas.” -Marie Curie-

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. OBJETIVOS	17
1.1. OBJETIVO GENERAL	17
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
2. MARCO TEÓRICO	18
2.1 CONCEPTOS DE LA AGROINDUSTRIA DE LA PALMA	18
2.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE PALMA	19
3. METODOLOGÍA	23
3.1 OPERACIÓN DE ESTERILIZACIÓN	25
3.1.1 Selección de variables de estudio	25
3.1.2 Diseño de experimentos	25
3.1.3 Desarrollo de pruebas en planta	27
3.1.4 Desarrollo de pruebas de laboratorio	27
3.1.5 Tratamiento estadístico de los resultados obtenidos	27
3.2 OPERACIÓN DE CLARIFICACIÓN	28
3.2.1 Clarificación estática	28
3.2.1.1 Selección de variables de estudio	28
3.2.1.2 Recolección de muestras en planta	28
3.2.1.3 Desarrollo de pruebas de laboratorio	28
3.2.1.4 Tratamiento estadístico de los resultados obtenidos	28
3.2.2 Clarificación dinámica	29
3.2.2.1 Selección de centrífugas para experimentos	29
3.2.2.2 Selección niveles de apertura para la válvula de aceite recuperado	29

3.2.2.4 Muestreo en planta	30
3.2.2.5 Desarrollo de pruebas de laboratorio	30
3.2.2.6 Tratamiento estadístico de los resultados obtenidos	30
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	31
4.1 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS PARA LA OPERACIÓN DE ESTERILIZACIÓN	31
4.1.1 Altura de llenado de la vagoneta de esterilización	31
4.1.2 Dosificación de racimos al desfrutador	32
4.1.3 Ubicación de racimos en vagonetas y esterilizador	34
4.1.4 Presión del tercer pico del ciclo de esterilización y tiempo de sostenimiento	35
4.2 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN PARA LA ETAPA DE CLARIFICACIÓN	37
4.2.1 Clarificación estática	37
4.2.1 Clarificación dinámica	38
4.2.1.1 Análisis para la centrífuga No. 1	39
4.2.1.2 Análisis para la centrífuga No. 2	40
5. CONCLUSIONES	42
6. RECOMENDACIONES	43
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44
BIBLIOGRAFÍA	47
ANEXOS	50

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Estructura del fruto y racimos procedentes de la palma africana	18
Figura 2. Diagrama de flujo del proceso de extracción de aceite rojo de palma	19
Figura 3. Estructura interna del clarificador continuo	21
Figura 4. Configuración de una centrífuga deslodadora	22
Figura 5. Desarrollo experimental del proyecto de investigación	24
Figura 6. Influencia de la altura de llenado de la vagoneta sobre la pérdida de aceite por impregnación en tusa	32
Figura 7. Comportamiento de la pérdida de aceite por impregnación en tusa y por fruto adherido debido al cambio en la frecuencia de dosificación del desfrutador.	33
Figura 8. Relación entre la frecuencia del variador y el tiempo de residencia de racimos en el tambor desfrutador.	33
Figura 9. Influencia de la ubicación de racimos sobre el porcentaje de pérdida de aceite en tusa y fruto adherido.	35
Figura 10. Pérdida de aceite en tusa a diferentes tiempos y presiones del tercer pico de esterilización	37
Figura 11. Cantidad de aceite recuperado en función de la apertura de la válvula de aceite recuperado para la centrífuga 1	39
Figura 12. Cantidad de aceite perdido en función de la apertura de la válvula de aceite recuperado para la centrífuga 1	40
Figura 13. Cantidad de aceite recuperado en función de la apertura de la válvula de aceite recuperado para la centrífuga 2	41
Figura 14. Cantidad de aceite recuperado en función de la apertura de la válvula de aceite recuperado para la centrífuga	41

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Comparativo de pérdidas en planta para el año 2010 en Colombia y Malasia	22
Tabla 2. Experimentos para evaluación del efecto de alturas de llenado de vagonetas en las líneas de proceso	26
Tabla 3. Experimentos para evaluación del efecto de dosificación de racimos al desfrutador en las líneas de proceso	26
Tabla 4. Experimentos para la evaluación del efecto de la ubicación del fruto en la vagoneta y en el autoclave.	26
Tabla 5. Experimentos para la evaluación del efecto de la presión del tercer pico y su tiempo de sostenimiento	27
Tabla 6. Análisis de varianza para la pérdida de aceite por impregnación en tusa debido a alturas de llenado de la vagoneta y líneas de operación	31
Tabla 7. Análisis de varianza para la pérdida de aceite por impregnación en tusa debido a frecuencias de dosificación y líneas de operación	32
Tabla 8. Análisis de varianza para la pérdida de aceite por impregnación en tusa debido a posición de racimos en vagonetas y esterilizador	34
Tabla 9. Análisis de varianza para la pérdida de aceite por impregnación en tusa debido a presión del pico 3 y tiempo de sostenimiento	36
Tabla 10. Variables que presentaron una correlación significativa en la operación de clarificación	37
Tabla 11. Promedios de control en la etapa de clarificación	38

## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. REPRESENTACIÓN DE UN CICLO DE ESTERILIZACIÓN	50
ANEXO B. CONCEPTO DE UNA LÍNEA DE OPERACIÓN	51
ANEXO C. TÉCNICA ESPECÍFICA DE MUESTREO PARA LOS FACTORES ANALIZADOS EN ESTERILIZACIÓN	52
ANEXO D. DETERMINACIÓN DE ACEITE EN TUSA	55
ANEXO E. DETERMINACIÓN DE ACEITE FRUTO ADHERIDO A TUSA	56
ANEXO F. MUESTREO EN LA OPERACIÓN DE CLARIFICACIÓN	57
ANEXO G. DETERMINACIÓN DE ACEITE EN LODOS	58
ANEXO H. DETERMINACIÓN DE ANÁLISIS RÁPIDOS	59
ANEXO I. PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE CAUDALES EN LAS CENTRÍFUGAS.	60
ANEXO J. ANÁLISIS DE VARIANZA ANOVA PARA LOS FACTORES EVALUADOS EN LA ETAPA DE ESTERILIZACIÓN	63
ANEXO K. TABLA DE CORRELACIÓN DE VARIABLES	66
ANEXO L. RESULTADOS ESTADÍSTICOS DE LOS BALANCES DE MASA EN CENTRIFUGACIÓN	67

## GLOSARIO

**Aceite crudo:** aceite sin procesar que presenta una coloración café rojiza y tiene una consistencia semisólida a temperatura ambiente. También es llamado licor de prensa. Mezcla constituida por aceite, agua del fruto, agua de dilución, sólidos naturales del fruto, arena y arcilla del suelo.

**Tusa o raquis:** soporte natural del fruto de palma. Está adherido al árbol de palma por el pedúnculo.

**Pedúnculo:** parte del raquis o tusa que lo adhiere al árbol de palma. Se prefiere cortar el raquis de tal manera que sobresalga un mínimo de pedúnculo, ya que éste absorbe aceite durante la esterilización.

**Esterilizador o autoclave:** recipiente de presión metálico de paredes gruesas con un cierre hermético que permite trabajar a alta presión para realizar una reacción industrial, una cocción o una esterilización con vapor de agua.

**Lodos pesados:** arena, arcilla, partículas pequeñas de huesco y fibras.

**Lodos livianos:** sustancias orgánicas como almidones, peptinas y gomas hidrolizadas.

**Fibra:** material celuloso del mesocarpio de la fruta de palma.

**RFF:** racimos de fruta fresca.

**SSNA:** designa los sólidos secos no aceitosos.

## RESUMEN

**TÍTULO:** EVALUACIÓN DE LOS FACTORES QUE INFLUYEN EN LA PÉRDIDA DE ACEITE DE PALMA AFRICANA DURANTE LAS OPERACIONES DE ESTERILIZACIÓN Y CLARIFICACIÓN EN LA PLANTA EXTRACTORA DE INDUPALMA LTDA\*

**AUTOR:** LIZETH XIMENA FLÓREZ DELGADO\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Extracción de aceite de palma, evaluación, factores, esterilización, clarificación, centrifugación, pérdida de aceite.

**CONTENIDO:** El presente trabajo muestra la evaluación de factores que afectan la pérdida de aceite rojo de palma en la planta extractora de Indupalma Ltda. En la operación de esterilización, se analizaron variables tales como ubicación de racimos en la vagoneta y el esterilizador, altura de llenado de vagonetas y dosificación de racimos al desfrutador. Por otra parte, se evaluó la presión del tercer pico del ciclo de esterilización y el tiempo de sostenimiento del mismo; todo lo anterior con el fin de establecer su relación con las pérdidas de aceite por impregnación en tusas. En la operación de clarificación, se realizó un estudio estadístico para conocer la relación entre los lodos livianos provenientes del clarificador y la pérdida de aceite en la descarga de las centrifugas. Adicionalmente, se determinó la apertura óptima de la válvula de la corriente de aceite recuperado.

En la etapa de esterilización, todos los factores analizados reportaron diferencias estadísticamente significativas favorables para la impregnación, luego de ser sometidos a un análisis de varianza con un 5% de error permitido. Se pudo establecer que para temporada baja de producción de la planta, es más conveniente trabajar con alturas bajas de llenado de las vagonetas y con una frecuencia aproximada de 20 rpm para el variador de velocidad del desfrutador.

El estudio en clarificación, mostró que a mayor cantidad de lodos livianos en el clarificador, mayor es la pérdida de aceite en la descarga de las centrifugas. Los balances de masa para la centrifugación, concluyeron que la apertura óptima para la válvula de la corriente de recuperado era de 2900 L/h en la centrifuga con capacidad nominal de 6000L/h y de 3000 L/h para la centrifuga con capacidad de 9000L/h, ya que en ellas se obtenían las menores pérdidas por efluentes y la mayor cantidad de aceite recuperado.

---

\* Proyecto de grado. Práctica empresarial, Indupalma Ltda.

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-químicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Ing. Luis Enrique Fuentes Peréa, Universidad Industrial de Santander, Co-Director: Ing. Wilmar Hernán Alarcón G., Indupalma Ltda.

## ABSTRACT

**TITLE:** EVALUATION OF FACTORS THAT INFLUENCE THE LOSS OF AFRICAN PALM OIL DURING THE PROCESSES OF STERILIZATION AND CLARIFICATION AT THE OIL EXTRACTION PLANT OF INDUPALMA LTD.\*

**AUTHOR:** LIZETH XIMENA FLÓREZ DELGADO\*\*

**KEYWORDS:** Palm oil extraction, evaluation, factors, sterilization, clarification, centrifugation, oil loss.

**DESCRIPTION:** This study shows the evaluation of factors affecting the red palm oil loss at the oil extraction plant of Indupalma Ltd. In the process of sterilization, a set of variables were analyzed such as the placement of bunches in the cargo wagon and the sterilizer, the filling levels of cargo wagons and the feeding rate of bunches to the fruit-separator machine. Furthermore, the pressure of the third sterilization cycle peak was evaluated and its sustaining time; all the above with the purpose of establishing its relationship with the oil losses due to impregnation of empty bunches. In the process of clarification, a statistical study was done in order to know the relationship between the light sludge coming from the settling tank and the oil losses in the centrifuges unloads. Additionally, the optimal valve opening of the retrieved oil stream was determined.

In the sterilization stage, the whole analyzed factors reported significant statistics differences which are favorable for the impregnation, after being subjected to a variance analysis. With a 5% of permissible error. It could be established that for the low season of production in the plant, it is more convenient to work with filling low levels in the cargo wagons with an approximated frequency of 20 rpm for the speed shifter of the fruit-separator machine.

The study about clarification showed that having a greater amount of light sludge in the settling tank, the greater the loss of oil in the centrifuges unloads. The mass balances for the centrifugation concluded that the optimal valve opening for the stream of recovery was 2900 L/h in the centrifuge of 6000 L/h, and the 3000 L/h for the centrifuge of 9000 L/h taking into account that in them were obtained the lower losses due to effluents and the larger amount of oil recovered.

---

\* Degree Work. Industrial Internship, Indupalma Ltd.

\*\* Chemical Engineering Department, Director: Luis Enrique Fuentes Peréa, P.Eng. Universidad Industrial de Santander, Co-Director: Wilmar Hernán Alarcón G, P.Eng. Indupalma Ltda.

## INTRODUCCIÓN

La agroindustria del aceite de palma es una actividad económica de gran proyección que ha presentado una dinámica importante en los últimos años en Colombia y el mundo. Según el anuario estadístico de Fedepalma de 2012, Colombia ocupa el quinto lugar en el escalafón mundial de productores de aceite de palma con 360,537 hectáreas sembradas. Por esta razón, es importante apostar a la innovación y el mejoramiento constante del tratamiento de beneficio, en aras de tener un proceso cada vez más rentable, eficiente y competitivo.

Según estudios realizados por Cenipalma (Centro de Investigaciones en Palma de Aceite) en diferentes temporadas del año a través del tiempo [1,2], se ha observado que al analizar frutos en el laboratorio para establecer su contenido de aceite, se obtiene una cifra de aceite por fruta del 26% [1]. Sin embargo, la mayoría de las plantas producen únicamente una cifra de aceite por fruto del 20%. No obstante, si se cosecharan racimos de igual madurez, tipo y calidad, se debería obtener un contenido de aceite (Tasa de Extracción) del 26%, pero esto no es así [2]. El negocio de palma africana ha venido perdiendo aceite en cantidades de alrededor del 6% de los racimos. De acuerdo a la literatura científica [3], estas pérdidas de aceite están distribuidas en el proceso de extracción de aceite de palma como se describe a continuación: 37% son debidas a la impregnación de aceite en tusa, 31% a efluentes, 27% a fibras, 3% a nueces y 2% a frutos adheridos en tusa.

Conociendo estos precedentes, resulta de suma importancia tomar acciones preventivas y correctivas en el proceso, mediante un efecto sinérgico combinando conceptos tanto ingenieriles como basados en las experiencias reales obtenidas a diario. En este orden de ideas, la empresa INDUPALMA Ltda. y en especial el área de calidad y laboratorio del departamento Industrial, se interesó en desarrollar investigación principalmente para la pérdida de

aceite por impregnación en tusa y en efluentes, puesto que se trata de los puntos críticos de detrimento en la planta.

Así bien, a lo largo de este proyecto se efectuaron metodologías de muestreo basadas en diseños experimentales con el fin de obtener una ligera pero representativa base de datos, que analizada de forma estadística, lograra describir la tendencia y correlación de las diferentes variables en las operaciones de esterilización y clarificación durante el proceso de extracción de aceite de palma.

De igual forma se realizaron balances máxicos de pérdidas y en algunos apartados se compararon parámetros, metas y procedimientos con las referencias que gravitan internamente en la empresa, para conocer la desviación existente y poder mejorarla.

Finalmente se emitieron los resultados y análisis de los mismos, de los cuales se extraen conclusiones y recomendaciones que de ser acogidas con permanencia, pueden conllevar tanto al aumento en el nivel de calidad del aceite terminado como a una extracción más eficiente y constante.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1. OBJETIVO GENERAL**

Evaluar los factores que influyen en la pérdida de aceite de palma africana en las operaciones de esterilización y clarificación de la planta extractora de Indupalma Ltda.

### **1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Evaluar la influencia de las variables de proceso: ubicación de racimos en las vagonetas y esterilizador, altura de llenado de las vagonetas de esterilización, dosificación de racimos al desfrutador y la desviación de los ciclos reales de esterilización sobre la impregnación de aceite en tusa.

Analizar la relación existente entre las diferentes variables en la etapa de clarificación y encontrar una aproximación a la apertura óptima de la válvula de aceite recuperado en las centrifugas deslodadoras, para alcanzar un equilibrio entre las menores pérdidas y la mayor cantidad de aceite recuperado, teniendo en cuenta la influencia de la dilución.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 CONCEPTOS DE LA AGROINDUSTRIA DE LA PALMA

La palma de aceite (*Elaeis Guineensis Jacq.*) es una planta perenne oleaginosa cuyo tallo puede alcanzar más de 30 metros de altura y produce racimos de frutos compactos que pueden pesar entre 10 y 40 kilogramos [4].

Figura 1. Estructura del fruto y racimos procedentes de la palma africana



Fuente: BORRERO, Jhon. Guía general del cultivo de palma de aceite. Buenos Aires, 1982. p. 682-685. [Modificado por el autor].

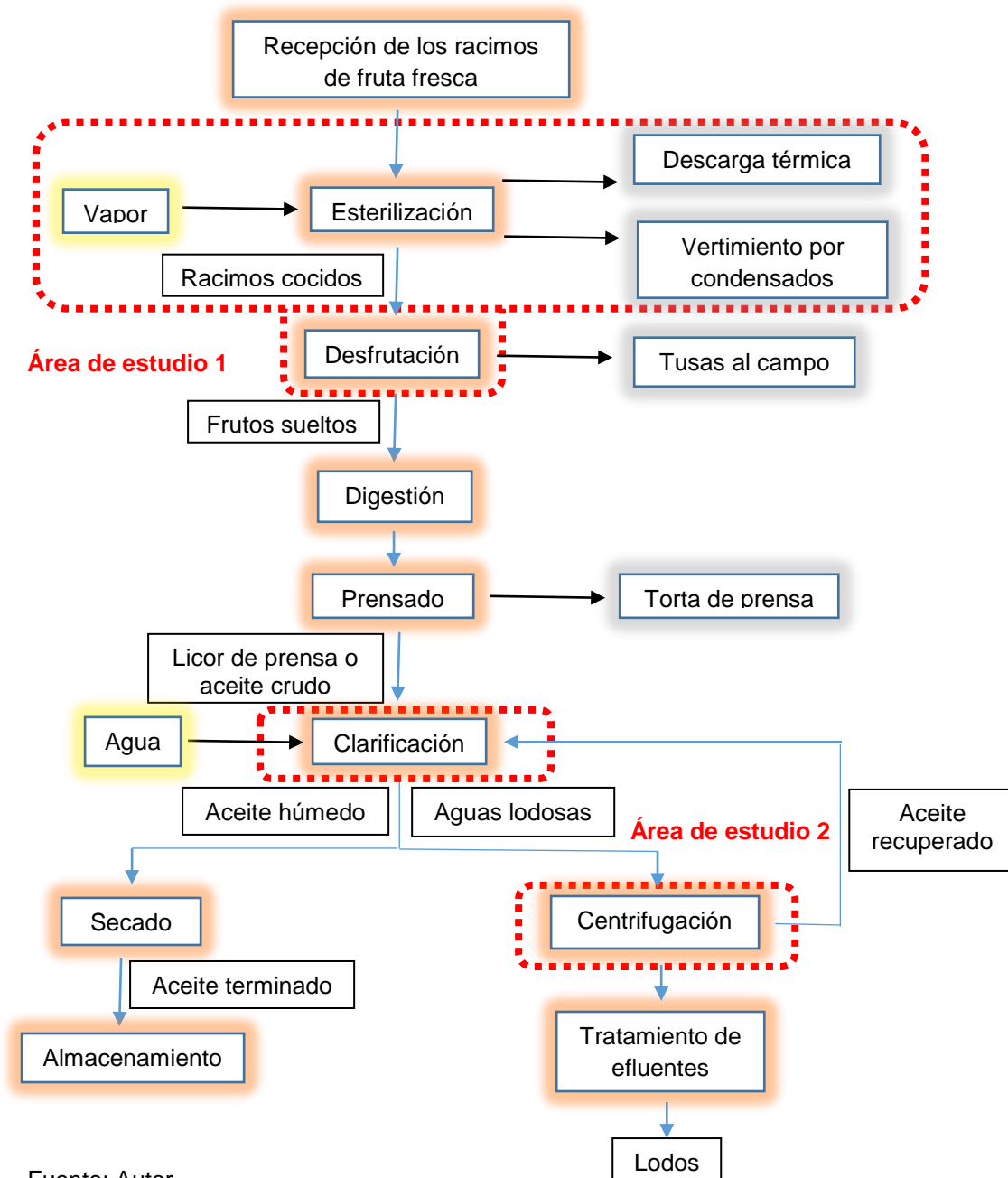
El fruto de palma está compuesto por el *exocarpio* o parte externa que lo envuelve, el *mesocarpio* una pulpa o tejido fibroso que contiene células con aceite, el *endocarpio* una nuez o semilla compuesta por un cuesco lignificado, y el *endospermo* o también llamado *almendra*, de la cual se extrae el aceite de palmiste (Figura 1 (a)).

Los frutos de la palma son una drupa de forma ovoide, de 3-6 cm de largo y con un peso de 5-12 g aproximadamente. Estos se encuentran dispuestos en racimos con brácteas puntiagudas (Figura 1 (b)), son de color rojizo y alcanzan hasta los 4 cm de diámetro, vienen adheridos a la tusa o raquis [5].

## 2.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE PALMA

El proceso de beneficio del aceite de palma consta de varias operaciones físicas. Para el caso particular de este proyecto, se estudiaron las operaciones de esterilización, desfrutación y clarificación-centrifugación (del aceite rojo) como se denota en la Figura 2.

Figura 2. Diagrama de flujo del proceso de extracción de aceite rojo de palma



Fuente: Autor

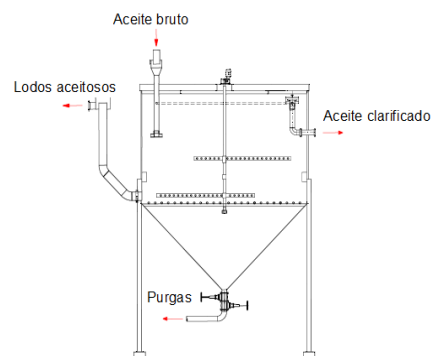
**La esterilización** es la primera etapa y seguramente la más importante del proceso de extracción del aceite de palma. Esto se debe a la incidencia que tiene dicho proceso en los pasos subsiguientes, al darle al fruto un tratamiento físico químico que afecta el rendimiento y calidad del aceite terminado [6]. Tal procedimiento se efectúa en un cilindro horizontal a presión, en el cual se ubican unas canastas de racimos o frutos sueltos. Consiste en someter al fruto a la acción de vapor, bajo un tiempo establecido para cumplir con los siguientes objetivos básicos [7]: inactivación de la enzima lipolítica “Lipasa”, preparación para el desprendimiento de los frutos del raquis, ablandamiento de los tejidos de la pulpa, deshidratación parcial de las almendras, hidrólisis y descomposición del material mucilaginoso (gomas). El consumo de vapor en la esterilización es de aproximadamente 180 kg/ton de racimos con tres “picos” de expansión (incrementos de la presión y descargas súbitas posteriores) (Anexo A) [8].

**La desfrutación** tiene como objetivo separar los racimos (ya esterilizados) en frutos sueltos y tusa. Los frutos separados pasan a la etapa de prensado, mientras que los racimos aparentemente vacíos en su totalidad son conducidos mediante una banda y transportados en camiones para ser usados luego en el campo como fertilizante orgánico [9]. El equipo en que tiene lugar esta operación, se denomina desfrutador de tambor rotatorio, en el cual los racimos van girando dentro del tambor y al llegar a la parte superior caen y se golpean desprendiendo los frutos. En esta sección del proceso, es importante controlar la velocidad de giro y la regularidad en la alimentación, para lo cual se dispone de un alimentador dosificador, por ejemplo del tipo de rodillo rotatorio de velocidad variable.

**La clarificación** efectúa la función de recuperar la mayor cantidad de aceite proveniente del prensado, retirando agua (secado) y sustancias sólidas (impurezas). Se clasifica en clarificación estática y clarificación dinámica.

La clarificación estática es el proceso convencional para separar el aceite de los lodos por decantación en un tanque clarificador. Estos equipos generalmente son cilindros verticales (sección circular) terminados en fondo cónico, con capacidad de hasta 100 toneladas de aceite rojo [10] (Figura 3). El fundamento de operación del clarificador se basa en el ‘principio de los vasos comunicantes’, el cual afirma que si dos recipientes están comunicados inferiormente entre sí, mantienen el mismo nivel siempre y cuando contengan el mismo líquido o líquidos miscibles. Si los líquidos son inmiscibles, la altura de capa es mayor para el líquido de menor densidad [6].

**Figura 3. Estructura interna del clarificador continuo**



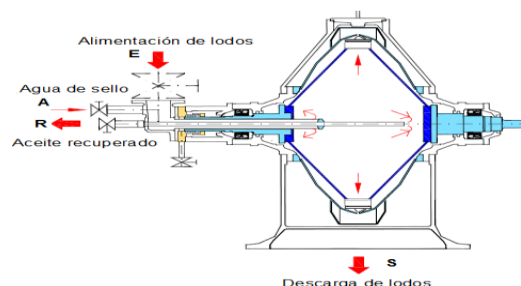
Fuente: WAMBECK, Noel. Sinopsis del proceso de la palma de aceite. Primera Edición. Colombia: Traducida al español por Guillermo Bernal, 2005. v. 1, 23 p

La salida del aceite debe estar a unos 5 cm por encima de la del agua para obtener una capa de aceite de aproximadamente 30-40 cm de manera continua (máximo 50 cm) [7].

La clarificación dinámica es el procedimiento para separar el aceite de la mezcla por medio de fuerza centrífuga. El agua y los lodos pesados salen por la boquilla o tobera y el aceite y los lodos livianos se quedan en el centro los cuales son descargados por un tubo recolector, llamado “recuperador” [11]. En la parte interna de la centrífuga hay una cavidad, parte rotatoria o *bowl* que gira

sobre dos ejes soportados por rodamientos: uno macizo y otro hueco (Figura 4).

**Figura 4. Configuración de una centrífuga deslodadora**



Fuente: WAMBECK, Noel. Sinopsis del proceso de la palma de aceite. Primera Edición. Colombia: Traducida al español por Guillermo Bernal, 2005. v. 1, 27 p.

### 2.3 PÉRDIDAS DE ACEITE EN PLANTA

Este es uno de los temas con objeto de mayor estudio en las plantas de beneficio primario. En la Tabla 1 se presenta un análisis comparativo del promedio de pérdidas por zonas colombianas que es de 1.79% contra 1.75% de Malasia (una de las naciones productoras de palma más importantes del mundo) [12].

**Tabla 1. Comparativo de pérdidas en planta para el año 2010 en Colombia y Malasia**

Pérdida (%Ac/RFF)	Zona Central	Zona Norte	Zona Oriental	Zona Occidental	Promedio Colombia	Malasia	Mínimos Colombia
Por impregnación en tusas	0,63	0,64	0,38	0,84	0,62	0,35	0,38
Por aceite en fruto adherido	0,04	0,01	0,03	0,01	0,02	0,35	0,01
Por impregnación en fibras	0,5	0,49	0,51	0,49	0,5	0,42	0,49
Por aceite en efluentes	0,51	0,64	0,54	0,63	0,58	0,58	0,51
Por impregnación en nueces	0,08	0,08	0,05	0,06	0,07	0,05	0,05
Total pérdidas	1,76	1,86	1,51	2,03	1,79	1,75	1,44

Fuente: CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN PALMA DE ACEITE. Archivo: Anuario estadístico 2011. Bogotá: CENIPALMA, 2011. 23 p

Las pérdidas en tusas se producen debido al aceite impregnado que queda en los racimos vacíos. Depende de muchos factores como el método de esterilización, el tipo de desfrutador y su operación, edad de los frutos, entre otros. Para analizar estas causas se han adelantado estudios en diferentes plantas del país. Por ejemplo, en el año 2002 se llegó a la conclusión de que en condiciones normales de maduración y esterilización, la mayor incidencia de la pérdida se causa por el desfrutado, cuyo porcentaje puede ser del 77% de la pérdida, sobre todo en la primera etapa del desfrutador (Cenipalma 2005).

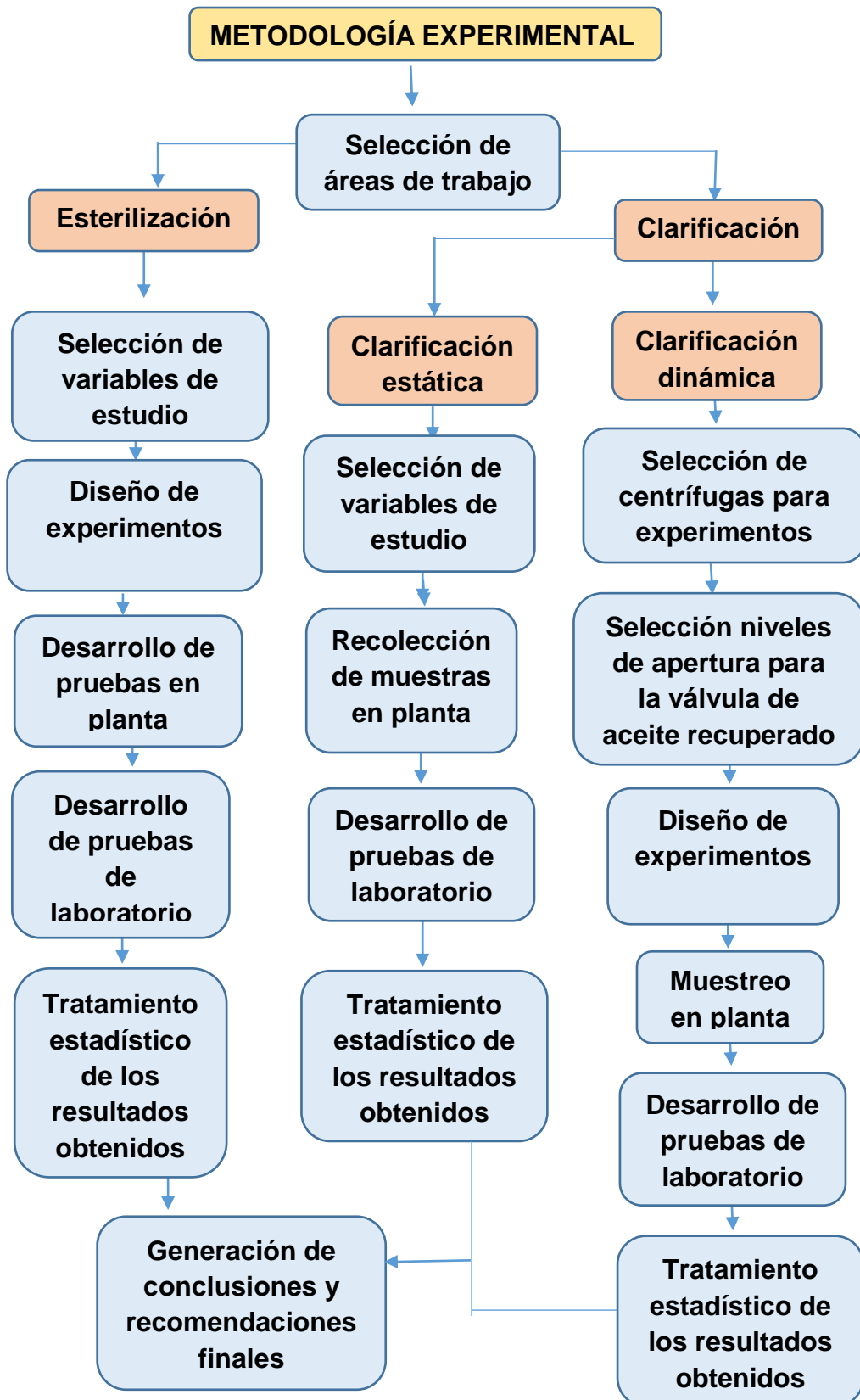
En cuanto al impacto de la presión en el esterilizador, se determinó hacia el 2003, que básicamente a menores presiones de esterilización en promedio, se obtienen mayores pérdidas y a presiones más elevadas las pérdidas disminuyen. De igual manera, se señaló que a medida que aumenta el tiempo de sostenimiento en la esterilización, las pérdidas por fruto adherido tienden a decrecer [8].

Las pérdidas en efluentes suceden por efecto de las purgas, vertimientos de los equipos encargados de la clarificación y algunos regueros presentes en la planta. Dichas cantidades generalmente no se miden ni se controlan. Grosso modo se puede decir que la pérdida en condensados de esterilización por lo general es del orden de 0.08% aceite/RFF y los lodos de centrífuga de 0.41%, es decir aproximadamente un 0.49%; sin embargo, en la operación real este porcentaje aumenta, alcanzando valores de incluso 0.59% aceite/RFF total [13].

### **3. METODOLOGÍA**

Para el desarrollo del presente proyecto se seleccionaron como objetivo principal de estudio las operaciones de esterilización y clarificación del proceso de extracción de aceite de palma, ya que estas representan las secciones más críticas de pérdida de aceite en la planta. La metodología de trabajo utilizada se resume en la Figura 5.

Figura 5. Desarrollo experimental del proyecto de investigación



## 3.1 OPERACIÓN DE ESTERILIZACIÓN

**3.1.1 Selección de variables de estudio** Se seleccionaron las siguientes variables de acuerdo a lo sugerido en la literatura [14] y a los requerimientos de los ingenieros de planta, con el fin de evaluar su posible influencia sobre la pérdida de aceite en tusas y la pérdida de aceite por frutos adheridos a tusa durante la operación de esterilización:

- Altura de llenado de las vagonetas de esterilización,
- Dosificación de racimos al desfrutador,
- Ubicación de racimos en las vagonetas y esterilizador,
- Presión del tercer pico de esterilización y su tiempo de sostenimiento.

**3.1.2 Diseño de experimentos** Para la planeación de los experimentos se siguió un diseño experimental de tipo factorial  $n*m*r$  [15], donde  $n$  corresponde al número de niveles del primer factor,  $m$  al número de niveles del segundo factor y  $r$  corresponde al total de repeticiones de cada condición de experimento  $n*m$  ( $r = 5$  en todos los casos de estudio).

Cada variable independiente se estudió por separado, ya que se querían observar otros niveles intermedios. En el primer caso, el diseño experimental estaba formado por dos factores: líneas de proceso y alturas de llenado, el primer factor con dos niveles: línea 1 y línea 2 y el segundo factor con tres niveles: 80 cm, 100 cm y 150 cm, ver Tabla 2. En el segundo caso, el diseño experimental estaba formado por los factores: líneas de proceso y frecuencias de dosificación de racimos al desfrutador, el primer factor con dos niveles: línea 1 y línea 2 y el segundo factor con tres niveles: 20 rpm, 25 rpm y 30 rpm, ver Tabla 3. Los niveles intermedios fueron escogidos, garantizando que no se convirtieran en una limitante para la producción diaria de la planta.

En el anexo B se especifica el concepto de una línea de operación.

**Tabla 2. Experimentos para evaluación del efecto de alturas de llenado de vagonetas en las líneas de proceso**

		LINEAS DE PROCESO	
		Línea 1	Línea 2
<b>ALTURA DE LLENADO</b>	80 cm	(Exp 1) x 5	(Exp 2) x 5
	100 cm	(Exp 3) x 5	(Exp 4) x 5
	150 cm	(Exp 5) x 5	(Exp 6) x 5

**Tabla 3. Experimentos para evaluación del efecto de dosificación de racimos al desfrutador en las líneas de proceso**

		LINEAS DE PROCESO	
		Línea 1	Línea 2
<b>FRECUENCIAS DE DOSIFICACIÓN</b>	20 rpm	(Exp 1) x 5	(Exp 2) x 5
	25 rpm	(Exp 3) x 5	(Exp 4) x 5
	30 rpm	(Exp 5) x 5	(Exp 6) x 5

En el tercer caso, el diseño experimental estaba formado por los factores: ubicación en vagonetas y ubicación a lo largo del esterilizador. El primer factor con dos niveles: superior e inferior y el segundo factor con tres niveles: vagones 1,3 y 5 (Figura 1-Anexo B y Tabla 4). Este experimento solamente se realizó en la línea 1 por las numerosas muestras que implicaba trabajarlo en las dos.

**Tabla 4. Experimentos para la evaluación del efecto de la ubicación del fruto en la vagoneta y en el autoclave.**

		UBICACIÓN EN VAGONETAS	
		Superior	Inferior
<b>UBICACIÓN EN AUTOCLAVE</b>	Vagoneta 1	(Exp 1) x 5	(Exp 2) x 5
	Vagoneta 3	(Exp 3) x 5	(Exp 4) x 5
	Vagoneta 5	(Exp 5) x 5	(Exp 6) x 5

Para evaluar el impacto de los ciclos de esterilización, se tenían dos factores: presión del pico 3 y tiempo de sostenimiento. El primer factor con tres niveles: 28-30,30-35 y 35-40 psi (expresados en rangos porque no era posible conseguir que la presión fuera totalmente constante) y el segundo factor con tres niveles: 40, 50 y 60 minutos (ver Tabla 5).

**Tabla 5. Experimentos para la evaluación del efecto de la presión del tercer pico y su tiempo de sostenimiento.**

		PRESIÓN DEL TERCER PICO		
		28 - 30 psi	30 - 35 psi	35 - 40 psi
TIEMPO DE SOSTENIMIENTO	40 min	(Exp 1) x 5	(Exp 2) x 5	(Exp 3) x 5
	50 min	(Exp 4) x 5	(Exp 5) x 5	(Exp 6) x 5
	60 min	(Exp 7) x 5	(Exp 8) x 5	(Exp 9) x 5

**3.1.3 Desarrollo de pruebas en planta** La técnica específica de muestreo se encuentra detallada en el Anexo C. Es importante además, aclarar que todos los experimentos fueron llevados a cabo en temporada baja de producción.

**3.1.4 Desarrollo de pruebas de laboratorio** Las pruebas que se llevaron a cabo fueron: determinación del contenido de aceite en tusa y contenido de aceite en frutos adheridos a tusa (Anexos D y E).

**3.1.5 Tratamiento estadístico de los resultados obtenidos** Se utilizó el software libre R 2.12.2 con el propósito de generar tablas de análisis de varianza ANOVA. Para todos los tratamientos a los que se les hizo análisis de varianza, se tuvo en cuenta que una variable influía significativamente sobre la pérdida de aceite por impregnación en tusa si el valor-p era inferior a 0,05 ya que es un nivel de significación científicamente aceptado, lo cual indica que satisface el nivel de confianza del 95% y rechaza la hipótesis nula. En los

casos que dicho valor era superior, se asumía que la variable no tenía influencia sobre la pérdida.

Se realizaron también, tablas de ANOVA detallados para conocer el efecto de cada uno de los niveles, en ellas se muestra el valor máximo y mínimo de pérdida por impregnación en tusa que puede llegar a alcanzar cada nivel, y de esa forma se concluía cuál resultaba más conveniente.

## **3.2 OPERACIÓN DE CLARIFICACIÓN**

### **3.2.1 Clarificación estática**

**3.2.1.1 Selección de variables de estudio** Se propuso estudiar 26 variables influyentes (Tabla 1- Anexo F), desde la dilución efectuada en el tanque de aceite crudo hasta la descarga de las centrífugas, todo ello con el fin de averiguar la relación existente o no entre los lodos livianos del clarificador estático y las pérdida en la descarga de las centrífugas desludadoras.

**3.2.1.2 Recolección de muestras en planta** Durante temporada baja de producción, se efectuó la recolección de muestras durante un tiempo de 30 días en los diferentes puntos escogidos (Figura 1- Anexo F)

**3.2.1.3 Desarrollo de pruebas de laboratorio** Las pruebas que se llevaron a cabo fueron: determinación de contenido de aceite en lodos provenientes de centrífugas y efluentes totales y análisis rápidos en clarificación (Anexo G y H).

**3.2.1.4 Tratamiento estadístico de los resultados obtenidos** Se trabajó en el programa R 2.12.2 con la correlación de PEARSON o correlación del producto – momento porque permite evaluar el efecto que una variable tiene sobre otra [15]. El estudio se realizó bajo un porcentaje del 95% de confiabilidad. Para

analizar los resultados, se tuvo en cuenta que si  $r = 1$ , existía una correlación positiva perfecta; si  $0 < r < 1$ , existía una correlación positiva; si  $r = 0$ , no existía relación; si  $-1 < r < 0$ , existía una correlación negativa y si  $r = -1$ , existía una correlación negativa perfecta. Se consideró que había influencia entre las variables cuando el factor de correlación ( $r$ ) fuera mayor de 0,30 (para correlación positiva) y de -0,30 (para correlación negativa) [15,16]. Se correlacionaron las variables y de acuerdo a su alta relación se estimaron condiciones óptimas en la dilución, es decir, se asignaron parámetros de control o sencillamente se mostró el promedio de las variables en caso de no haber una relación aceptable.

### **3.2.2 Clarificación dinámica**

**3.2.2.1 Selección de centrífugas para experimentos** Se estudió la centrífuga No. 1 (con capacidad nominal de 9000 L/h, 12 boquillas de 1.7mm y velocidad de 1450 rpm) y la centrífuga No. 2 (con capacidad nominal de 6000L/h, 6 boquillas de 1.7mm y velocidad de 1450 rpm).

**3.2.2.2 Selección niveles de apertura para la válvula de aceite recuperado** Las aperturas de la válvula de recuperado evaluadas fueron: mínima (25%), media (50%), alta (75%) y máxima (100%), es decir, para la deslodadora 1 caudales de recuperado de 1200, 1800, 2900 y 4300 L/h y para la deslodadora 2 caudales de recuperado de 670, 1100, 1900 y 3000 L/h.

**3.2.2.3 Desarrollo del diseño experimental** Para cada una de las centrífugas se llevó a cabo un diseño experimental tipo factorial  $m*r$  [15], es decir  $4 \times 10$  puesto que se tenía un factor de interés con cuatro niveles, realizando diez réplicas por cada centrífuga para un total de 80 experimentos.

**3.2.2.4 Muestreo en planta** Se destinaron 15 días (durante temporada baja de producción) para muestreo en cada apertura, realizando repeticiones dos veces por día en la mañana y en la tarde. Se midieron los caudales de alimentación, recuperado y descarga de las centrífugas bajo un procedimiento específico (Anexo I). Las variables de respuesta fueron: caudales y composiciones volumétricas.

**3.2.2.5 Desarrollo de pruebas de laboratorio** Se llevaron a cabo los procedimientos de análisis rápidos en clarificación y determinación de contenido de aceite en lodos provenientes de centrífugas y efluentes totales (Anexos G y H).

**3.2.2.6 Tratamiento estadístico de los resultados obtenidos** Se realizaron balances de masa para cada centrífuga. Posteriormente se promediaron los resultados y se pudo conocer el valor óptimo de la apertura para las válvulas de aceite recuperado de las centrífugas.

## 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 4.1 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS PARA LA OPERACIÓN DE ESTERILIZACIÓN

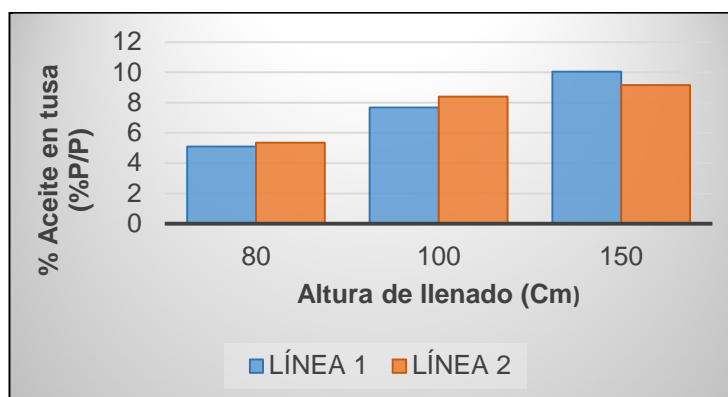
**4.1.1 Altura de llenado de la vagoneta de esterilización** El análisis estadístico de los resultados del efecto de la altura de llenado de la vagoneta y de las líneas de esterilización sobre la pérdida de aceite en tusa permitió establecer que esta última sólo es afectada por la altura de llenado de las vagonetas (valor-p < 0,05). Por otro lado, también permitió establecer que el efecto de las líneas de operación es nulo o despreciable (Ver Tabla 6).

**Tabla 6. Análisis de varianza para la pérdida de aceite por impregnación en tusa debido a alturas de llenado de la vagoneta y líneas de operación**

Fuente	Suma de cuadrados	Df	Cuadrado medio	Prueba - F	Valor -p
Alturas	241,5505	2	120,7752	70,1478	0,0001
Líneas	51,9113	7	7,4159	0,7538	0,7334
Total	293,4618	9			

Los resultados mostrados en la Figura 6 y el análisis estadístico presentado en la Tabla 1-Anexo J permitieron establecer que la menor pérdida de aceite en tusa era obtenida a una altura de llenado de la vagoneta de 80 cm y que incrementos en la altura de llenado a 100 y 150 cm ocasiona aumentos en la pérdida de 36% y 41%, respectivamente. Se comprueba que el aumento de la altura de llenado, incrementa el contenido de aceite en tusa, tal como reportan algunos autores en la literatura [19].

**Figura 6. Influencia de la altura de llenado de la vagoneta sobre la pérdida de aceite por impregnación en tusa**



**4.1.2 Dosificación de racimos al desfrutador** El análisis estadístico de los resultados del efecto de la dosificación de racimos al desfrutador y de las líneas de esterilización, permitió establecer que solamente la dosificación de racimos al desfrutador influye sobre la pérdida de aceite en tusa (valor-p < 0,05). Por otra parte, se logró constatar (una vez más) que el efecto de las líneas de operación es nulo o despreciable (Ver Tabla 7).

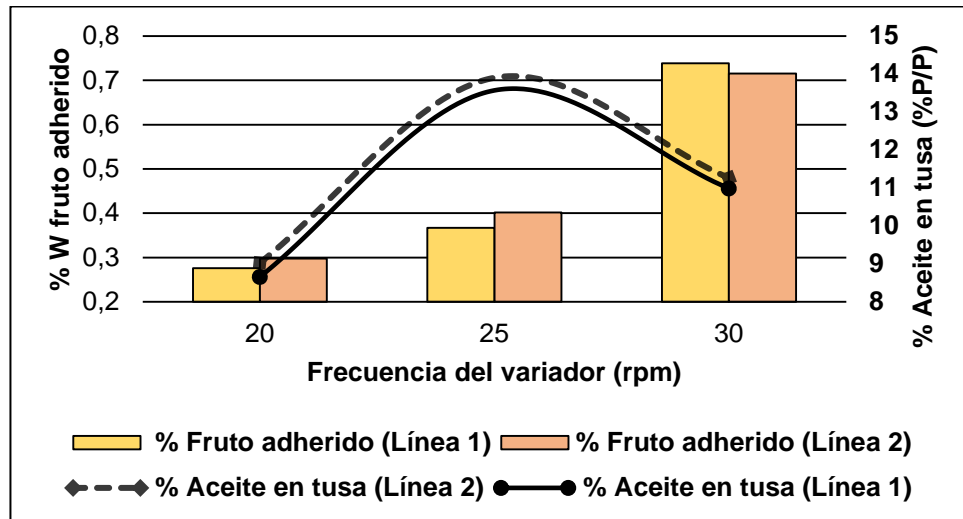
**Tabla 7. Análisis de varianza para la pérdida de aceite por impregnación en tusa debido a frecuencias de dosificación y líneas de operación**

Fuente	Suma de cuadrados	Df	Cuadrado medio	Prueba - F	Valor -p
Frecuencias	151,8075	2	75,90375	21,5048	0,0000
Líneas	43,4840	7	6,212	0,8213	0,648
Total	195,2915	9			

Los resultados mostrados en la Figura 7 y el análisis estadístico presentado en la Tabla 2-Anexo J permitieron establecer que la menor pérdida de aceite en tusa era obtenida a una dosificación de racimos de 20 rpm y que dicha pérdida alcanzaba un valor máximo en una frecuencia de 25 rpm, provocando en promedio un incremento del 36%. Sin embargo, al pasar a una velocidad de 30 rpm, se vuelve a observar un descenso en la pérdida por impregnación en

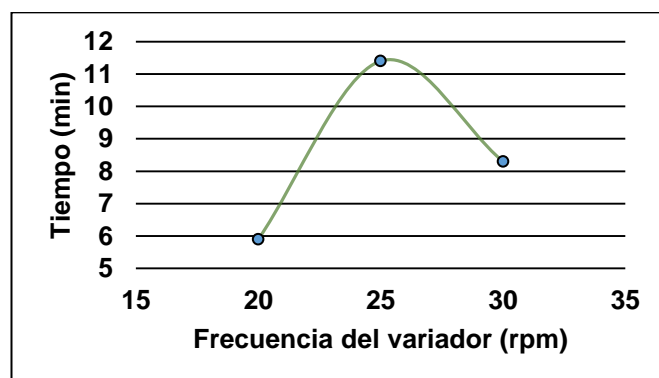
tusas del 20%. De otro lado, la pérdida por fruto adherido a tusas presenta un comportamiento de aumento a medida que la frecuencia es mayor.

**Figura 7. Comportamiento de la pérdida de aceite por impregnación en tusa y por fruto adherido debido al cambio en la frecuencia de dosificación del desfrutador.**



Estas cifras pueden ser explicadas con el tiempo de residencia, el cual comprobó que a 25 rpm se obtiene una mayor duración de los racimos dentro del desfrutador (Figura 8).

**Figura 8. Relación entre la frecuencia del variador y el tiempo de residencia de racimos en el tambor desfrutador.**



El hallazgo de los anteriores datos demuestra la importancia que tiene el sistema de dosificación de racimos en la eficiencia del desfrutador y por tanto en la reducción de pérdidas de aceite. Este análisis deja claro además, que para reducir el porcentaje de pérdida tanto en tusa como en fruto adherido no es necesario aumentar el número de revoluciones por minuto del desfrutador o sobredimensionar el equipo como se sugería en algunos textos antiguamente [20]. La planta en cuestión (a la fecha de la realización del estudio), estaba trabajando a 27 rpm en temporada baja de producción, pero se comprobó que para esa misma época, el valor óptimo de frecuencia es de 20 rpm garantizando que no se convierte en una limitante para la producción.

**4.1.3 Ubicación de racimos en vagonetas y esterilizador.** El análisis estadístico de los resultados del efecto de la ubicación de racimos en vagonetas y el esterilizador, permitió establecer que los dos factores influyen sobre la pérdida de aceite en tusa (valor-p < 0,05) (Tabla 8).

**Tabla 8. Análisis de varianza para la pérdida de aceite por impregnación en tusa debido a posición de racimos en vagonetas y esterilizador**

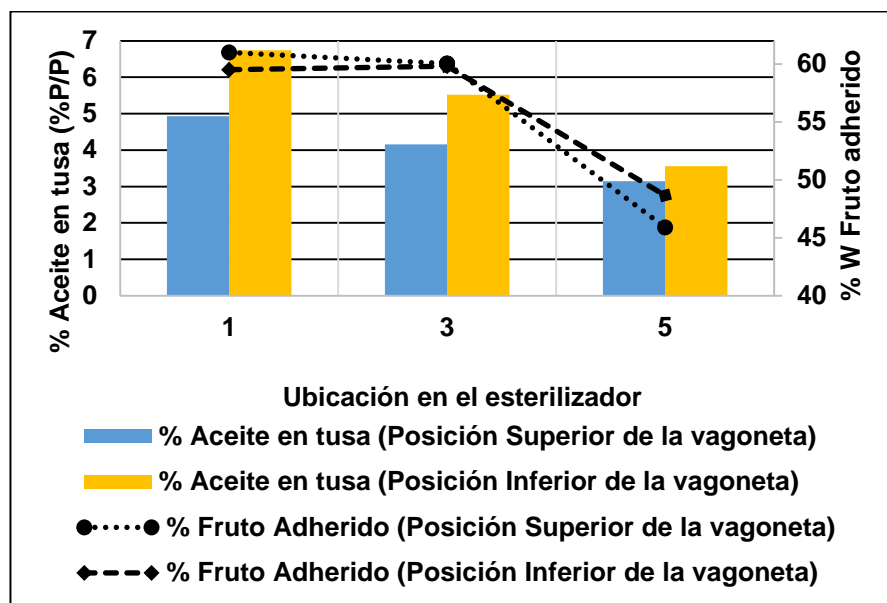
Fuente	Suma de cuadrados	Df	Cuadrado medio	Prueba - F	Valor -p
Posición en vagonetas	63,3075	7	9,043928571	1,7181	0,0321
Posición en esterilizador	92,3044	2	46,1522	23,7979	0,0023
Total	155,6119	9			

Los resultados mostrados en la Figura 9 y el análisis estadístico presentado en la Tablas 3 y 4-Anexo J permitieron establecer que la menor pérdida de aceite en tusa es obtenida en la posición superior de las vagonetas de esterilización con un 24,7% menos de impregnación de aceite en tusa que cuando se encuentran en la posición inferior de la misma, lo cual coincide con el reporte Díaz-Granados (1986) [21]; y que a medida que el fruto se aleja de la entrada de vapor del esterilizador (posición 5), la pérdida por impregnación en tusa

tiende a incrementar. Esto traduce que posiblemente el autoclave no recibe vapor de manera homogénea a lo largo del mismo, razón por la cual los racimos ubicados en la parte intermedia están siendo mejor esterilizados.

Para la pérdida por fruto adherido a tusa, no se evidencian grandes cambios al pasar de la posición 1 a la posición 3. Sin embargo en la ubicación central del autoclave (5) la pérdida por fruto adherido a tusa disminuye en un 23,5%. Este resultado hace referencia a los frutos que quedan adheridos antes de pasar por el desfrutador.

**Figura 9. Influencia de la ubicación de racimos sobre el porcentaje de pérdida de aceite en tusa y fruto adherido.**



**4.1.4 Presión del tercer pico del ciclo de esterilización y tiempo de sostenimiento.** El análisis estadístico de los resultados permitió establecer que los dos factores influyen sobre la pérdida de aceite en tusa (valor-p < 0,05) (Tabla 9).

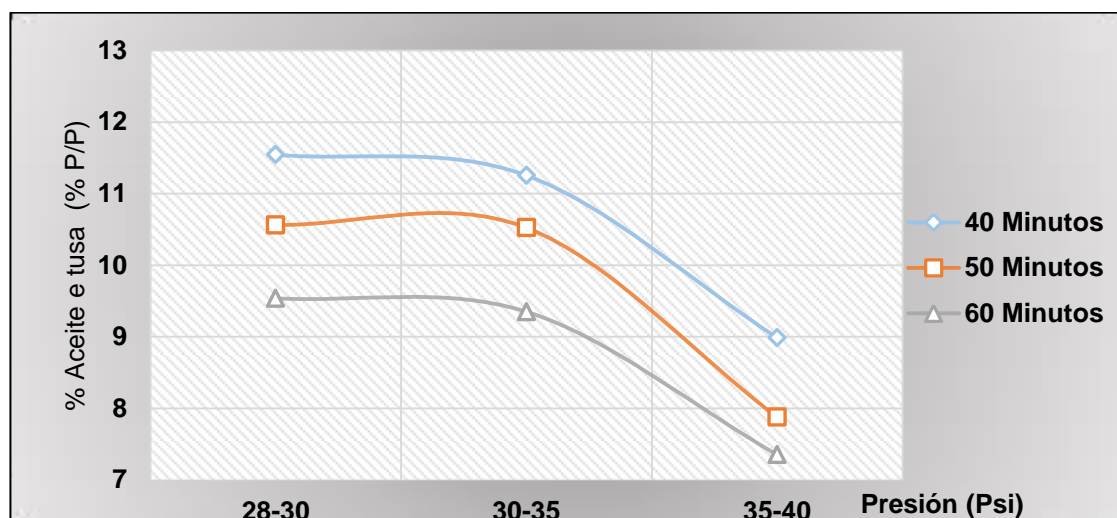
**Tabla 9. Análisis de varianza para la pérdida de aceite por impregnación en tusa debido a presión del pico 3 y tiempo de sostenimiento**

Fuente	Suma de cuadrados	Df	Cuadrado medio	Prueba - F	Valor -p
Presión del pico 3	89,3172	2	44,6586	31,0333	0,0028
Tiempo de sostenimiento	35,3017	7	5,0431	2,0325	0,0102
Total	124,6189	9			

Los resultados mostrados en la Figura 10 y el análisis estadístico presentado en la Tabla 5 y 6-Anexo J, comprueban que la mayor pérdida por impregnación en tusa se obtiene a presiones entre 28 y 30 psi y que cuando se logran alcanzar presiones cercanas a 40 psi dicha pérdida disminuye en promedio un 22,2%. Adicionalmente muestra que la menor pérdida se obtiene para un tiempo de 60 minutos; por ejemplo, para un aumento de 40 a 60 minutos se registró en promedio una disminución del 17,5%.

En ese orden de ideas, se podría pensar que a mayor tiempo de sostenimiento se obtienen menores pérdidas puesto que se logra una mejor esterilización del fruto, sin embargo se recomienda que este tiempo no sobrepase los 60 minutos, porque afecta el color de las almendras y por tanto la calidad del aceite de palmiste [22].

Figura 10. Pérdida de aceite en tusa a diferentes tiempos y presiones del tercer pico de esterilización



## 4.2 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN PARA LA ETAPA DE CLARIFICACIÓN

**4.2.1 Clarificación estática** De acuerdo al estudio estadístico se observó cuáles variables presentaban una alta relación entre ellas (Tabla 10). La lista completa con todas las demás variables analizadas se encuentra registrada en la Tabla 1-Anexo K.

Tabla 10. Variables que presentaron una correlación significativa en la operación de clarificación

	LLC1	AGLD1	AGLD2
ARFFD1	0,416	-	-
AGLD1	0,411	-	-
ARFFD2	0,468	-	-
AGLD2	0,452	-	-
LLCR	0,620	0,385	0,401
AGCR	-0,442	-	-

Se puede ver la relación existente entre los lodos livianos a la salida del clarificador con las pérdidas en gramos por litro a la salida de las centrífugas 1 y 2 ( $r = 0,411$  y  $0,452$  respectivamente). De igual forma, se notó una relación

de estos lodos livianos en la salida del clarificador con respecto a la pérdida de aceite sobre RFF en la descarga de las centrífugas 1 y 2 de 0,416 y 0,468, respectivamente. También de estos lodos livianos en la salida del clarificador con los lodos livianos en el tanque de aceite crudo de 0,620.

Se encontró además una correlación entre el agua de dilución y los lodos livianos a la salida del clarificador, inversamente proporcional de -0,442. Adicionalmente, se halló que entre los lodos livianos en el tanque de aceite crudo y los gramos por litro de aceite en la descarga de las centrífugas 1 y 2 existe una relación de 0,385 y 0,401, respectivamente.

De acuerdo a las correlaciones, se propone una tabla que establece los límites a los cuales se deberían mantener las variables de proceso para garantizar una mayor eficiencia en la operación de clarificación estática y menores pérdidas por efluentes (Tabla 11).

**Tabla 11. Promedios de control en la etapa de clarificación**

<b>Variable a controlar</b>	<b>sigla</b>	<b>norma</b>
%vol. Aceite en el clarificador	LAC1	< 5
%vol. Lodos livianos en el clarificador	LLC1	< 6
%vol. Agua en el clarificador	AGC1	< 59
%vol. Lodos pesados en el clarificador	LPC1	< 25
% vol. Lodos livianos en crudo	LLCR	< 5
% vol. Agua en crudo	AGCR	< 25
Relación agua/lodos pesados en crudo	AGLP	2,5
Relación aceite/agua en crudo	ACAG	1,4

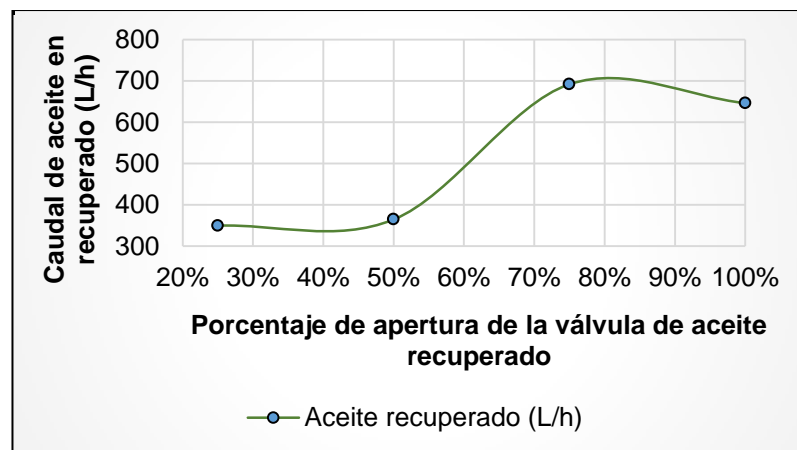
#### **4.2.1 Clarificación dinámica**

En el Anexo L, se da un ejemplo de los balances de masa efectuados para las diferentes aperturas de la válvula de recuperado. Y en las Tablas 1 y 2- Anexo L se muestra el resultado estadístico de todos los balances de masa.

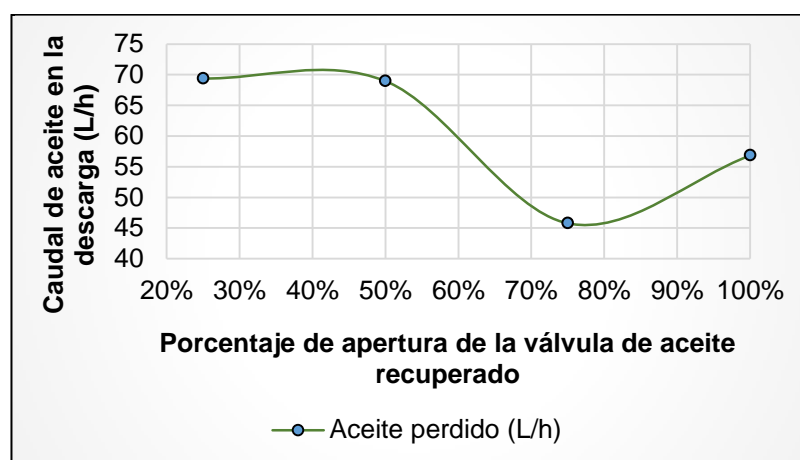
**4.2.1.1 Análisis para la centrífuga No. 1** El balance de masa realizado a la centrífuga 1 cuando se operaba con un caudal de recuperado de 2881,25 L/h (75% de apertura), permitió obtener una corriente de aceite recuperado de 691,79 L/h y una corriente de aceite perdido de 45,78 L/h, siendo éste el punto con pérdidas más bajas y mayor cantidad de aceite recuperado. Esto se puede visualizar de una mejor manera en las Figuras 11 y 12. Por tal razón, se puede sugerir este caudal como el óptimo para trabajar la centrífuga.

Con los demás caudales se nota un aumento en las pérdidas de aceite y una disminución en la cantidad de aceite recuperado, por lo tanto no serían recomendables para el funcionamiento de la centrífuga.

**Figura 11. Cantidad de aceite recuperado en función de la apertura de la válvula de aceite recuperado para la centrífuga 1**



**Figura 12. Cantidad de aceite perdido en función de la apertura de la válvula de aceite recuperado para la centrífuga 1**



**4.2.1.2 Análisis para la centrífuga No. 2** El balance de masa realizado a la centrífuga 2 cuando se operaba con un caudal de recuperado de 2909,73 L/h (100% de apertura), permitió obtener una corriente de aceite recuperado de 422,78L/h y una corriente de aceite perdido de 27,86 L/h, siendo éste el punto con pérdidas más bajas y mayor cantidad de aceite recuperado. Esto se puede visualizar de una mejor manera en las Figuras 13 y 14. Por tanto, se puede sugerir este caudal como el óptimo para trabajar la centrífuga.

Con los demás caudales se nota un aumento en las pérdidas de aceite y una disminución en la cantidad de aceite recuperado, por lo tanto no serían recomendables para el funcionamiento de la centrífuga. Sin embargo, la ventaja de estas aperturas, radica en que a medida que disminuye el caudal, también se disminuye la cantidad de aguas lodosas retornadas al proceso.

Por otro lado, se observa que a medida que aumenta el agua en la entrada se aumenta el agua en el recuperado de la centrífuga y esta a su vez disminuye las pérdidas de aceite y los SSNA a la salida de la centrífuga (Figuras 1 y 2- Anexo L).

Figura 13. Cantidad de aceite recuperado en función de la apertura de la válvula de aceite recuperado para la centrífuga 2

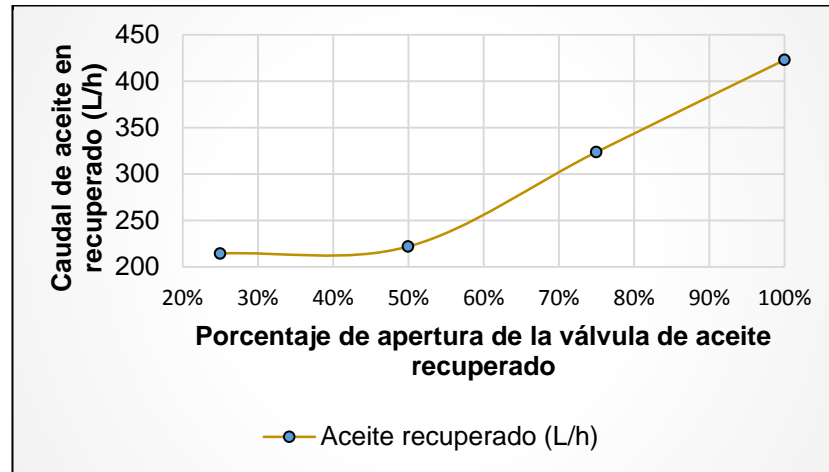
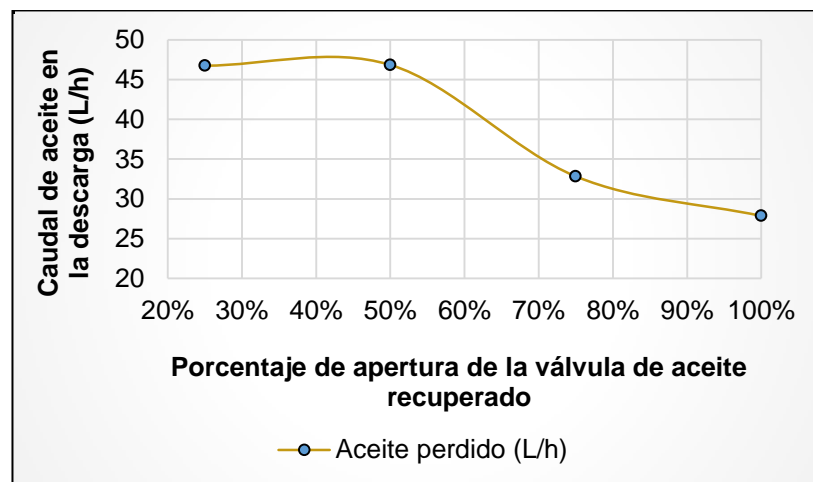


Figura 14. Cantidad de aceite perdido en función de la apertura de la válvula de aceite recuperado para la centrífuga 2



## 5. CONCLUSIONES

Todas las variables analizadas en la operación de esterilización son influyentes sobre la pérdida de aceite por impregnación en tusa.

- ◆ Los racimos de fruto ubicados en la parte superior de las vagonetas presentan menor grado de impregnación de aceite en tusa que los racimos ubicados en la parte inferior de la misma.
- ◆ Los racimos de fruto ubicados debajo de la entrada de vapor del esterilizador, están siendo mejor esterilizados que los que se alejan de ésta.
- ◆ De acuerdo a la producción diaria de la planta, en temporada baja resulta mejor trabajar con alturas aproximadas a 80 cm de las vagonetas de esterilización y con una frecuencia de 20 rpm en el variador de velocidad del tambor desfrutador.
- ◆ El aumento tanto en el tiempo de sostenimiento como en la presión del tercer pico contribuye favorablemente en la disminución de la pérdida de aceite en tusas por racimo de fruta fresca.

Los lodos livianos influyen significativamente en las pérdidas por descarga de las centrífugas de una forma directa, es decir que a mayores lodos livianos en la salida del clarificador, mayor es la pérdida en las centrífugas.

Para la centrífuga con capacidad nominal de 9000 L/h la apertura óptima de la válvula de recuperado es al 75% (caudal de recuperado de 2881,25 L/h) y para la centrífuga con capacidad nominal de 6000 L/h la apertura óptima de la válvula de recuperado es la máxima (caudal de recuperado de 2909,73 L/h), puesto que en ellas se obtienen las menores pérdidas y la mayor cantidad de aceite recuperado.

## 6. RECOMENDACIONES

### Recomendaciones de aplicación en planta:

Llenar las vagonetas de esterilización hasta una altura de 80 cm y trabajar el variador de velocidad del tambor desfrutador a una frecuencia de 20 rpm.

Realizar revisión de la distribución de vapor en los equipos de esterilización porque se sospecha que no se está logrando de una manera homogénea.

Inspeccionar el suministro de vapor proveniente de la caldera para lograr presiones cercanas a 40 psi durante el tercer pico de esterilización. Proporcionar tiempo de sostenimiento de 60 minutos.

Aplicar los parámetros de control sugeridos, en la etapa de clarificación estática.

Mantener la apertura de las válvulas de aceite recuperado al 75% y 100% para las centrifugas deslodadoras de 9000 L/h y 6000 L/h respectivamente.

### Recomendaciones para estudios posteriores:

Hacer una investigación detallada de lo que sucede al interior del tambor desfrutador, para conocer por qué los tiempos de residencia de los racimos presentan un comportamiento cuadrático al aumentar la frecuencia de dosificación.

Revisar el diseño de los equipos generadores y distribuidores de vapor.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CÁRDENAS, Jofrey. Un vistazo al impacto ambiental de la extracción palmera. En: Revista Palmas. [En línea]. Vol. 34, No. 3 (2013). [Consultado 13 feb. 2014]. Disponible en <<http://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/10881/10871>>.
- [2] COMPARACIÓN DEL POTENCIAL aceitero en países promisorios. Kuala Lumpur, 1998. 63p.
- [3] CADENA, Omar. Palma de aceite en Colombia: Balance de pérdidas zona central. En: Trabajos de Investigación Fedepalma: análisis zonal. Vol. 21, No. 3 (2000); p. 5.
- [4] AGROINDUSTRIA DE LA PALMA africana: diagnóstico de libre competencia. Superintendencia de industria y comercio. CORPOCESAR. 2013. 1 p.
- [5] AGRINOVA SCIENCE. El cultivo de la palma africana [CD- ROOM], Colombia, 2010.
- [6] WAMBECK, Noel. Sinopsis del proceso de la palma de aceite. Primera Edición. Colombia: Traducida al español por Guillermo Bernal, 2005. v. 1, p. 3-20.
- [7] URUETA, Juan. Herramientas para control de procesos en palma de aceite. Santo Domingo de los Colorados - Ecuador, 2008. p. 8 – 68.
- [8] CAPACITACIÓN TÉCNICA en proceso. Planta de beneficio. Servicios técnicos especializados. Cenipalma. Bogotá, 2012. p. 3 – 28.
- [9] ARAQUE, Jairo. Nuevas técnicas: Implementación de buenas prácticas de desfrutado. En: Open Journal Systems. Vol. 31, tomo 2 (2010).
- [10] BELTRÁN, Carlos. Macro y mini plantas extractoras de aceite de palma africana. Fedepalma. Bogotá Colombia, 1989. p. 40 – 45.
- [11] MODADUGU, Van., et al. Centrifugal sludge. 1987. 38 p.

[12] CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN PALMA DE ACEITE. Archivo: Anuario estadístico 2011. Bogotá: CENIPALMA, 2011.

[13] OLIE J.J & TJENG. T.D. The extraction of palm oil. Paris. 1980. p. 915-920.

[14] ROXB, Jansen & PIETRZAK, Boris. Palm oil losses in Malaysia. Putrajaya, 1985. 256 p.

[15] LEVIN Richard. Estadística para administradores. Prentice Hall International. Madrid. 1981. 572 p.

[16] PORTUS GOVIDEN, Lincoyán. Curso práctico de estadística. Mc Graw Hill. Bogotá. Noviembre 1991. 192 p.

[17] NIETO, Diego Ignacio., et al. Medición del potencial industrial de aceite en plantas de beneficio usando sistemas de medición de caudal tipo vertederos: diseño y operación. Bogotá, 2011. 9 p.

[18] MEHERWAN, Boyce. Transport and storage of fluids: measurement of flow. En: PERRY, Robert. Perry's chemical engineers' handbook. Seventh edition. United States of America: Mc Graw Hill, 1999. Chapter 10. p. 19-20.

[19] SAAVEDRA VILLALOBOS, Elkin. Determinación de pérdidas representativas en una planta extractora de Tumaco. Bogotá, 2006, 53 h. Trabajo de grado (Ingeniero de Producción Agroindustrial). Universidad de la Sabana. Facultad de Ingeniería.

[20] ZAMBRANO, Carlos. Importancia de la desfrutación en el proceso de palma africana: examinación intrínseca. La Fortaleza-Puerto Rico, 1989. p. 10 – 11.

[21] DÍAZ – GRANADOS, Segovia. Caracterización de pérdidas en plantas extractoras: 1, 2, 3 en reglamentos de esterilización. En: Ensayos de optimización. Vol. 10, No. 2 (2003); p. 19.

[22] MORGAN, Mckency. Sterilizers: a technological process. Phoenix - United States of America, 1997. p. 15-16.

## BIBLIOGRAFÍA

AGRINOVA SCIENCE. El cultivo de la palma africana [CD- ROOM], Colombia, 2010.

AGROINDUSTRIA DE LA PALMA africana: diagnóstico de libre competencia. Superintendencia de industria y comercio. CORPOCESAR. 2013. 1 p.

ARAQUE, Jairo. Nuevas técnicas: Implementación de buenas prácticas de desfrutado. En: Open Journal Systems. Vol. 31, tomo 2 (2010).

BELTRÁN, Carlos. Macro y mini plantas extractoras de aceite de palma africana. Fedepalma. Bogotá Colombia, 1989. p. 40 – 45.

CADENA, Omar. Palma de aceite en Colombia: Balance de pérdidas zona central. En: Trabajos de Investigación Fedepalma: análisis zonal. Vol. 21, No. 3 (2000); p. 5.

CÁRDENAS, Jofrey. Un vistazo al impacto ambiental de la extracción palmera. En: Revista Palmas. [En línea]. Vol. 34, No. 3 (2013). [Consultado 13 feb. 2014]. Disponible en <<http://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/10881/10871>>.

CAPACITACIÓN TÉCNICA en proceso. Planta de beneficio. Servicios técnicos especializados. Cenipalma. Bogotá, 2012. p. 3 – 28.

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN PALMA DE ACEITE. Archivo: Anuario estadístico 2011. Bogotá: CENIPALMA, 2011.

COMPARACIÓN DEL POTENCIAL aceitero en países promisorios. Kuala Lumpur, 1998. 63p.

DÍAZ – GRANADOS, Segovia. Caracterización de pérdidas en plantas extractoras: 1, 2, 3 en reglamentos de esterilización. En: Ensayos de optimización. Vol. 10, No. 2 (2003); p. 19.

LEVIN Richard. Estadística para administradores. Prentice Hall International. Madrid. 1981. 572 p.

MEHERWAN, Boyce. Transport and storage of fluids: measurement of flow. En: PERRY, Robert. Perry's chemical engineers' handbook. Seventh edition. United States of America: Mc Graw Hill, 1999. Chapter 10. p. 19-20.

MODADUGU, Van., et al. Centrifugal sludge. 1987. 38 p.

MORGAN, Mckency. Sterilizers: a technological process. Phoenix - United States of America, 1997. p. 15-16.

NIETO, Diego Ignacio., et al. Medición del potencial industrial de aceite en plantas de beneficio usando sistemas de medición de caudal tipo vertederos: diseño y operación. Bogotá, 2011. 9 p.

OLIE J.J & TJENG. T.D. The extraction of palm oil. Paris. 1980. p. 915-920.

PORTUS GOVIDEN, Lincoyán. Curso práctico de estadística. Mc Graw Hill. Bogotá. Noviembre 1991. 192 p.

ROXB, Jansen & PIETRZAK, Boris. Palm oil losses in Malaysia. Putrajaya, 1985. 256 p.

SAAVEDRA VILLALOBOS, Elkin. Determinación de pérdidas representativas en una planta extractora de Tumaco. Bogotá, 2006, 53 h. Trabajo de grado (Ingeniero de Producción Agroindustrial). Universidad de la Sabana. Facultad de Ingeniería.

URUETA, Juan. Herramientas para control de procesos en palma de aceite. Santo Domingo de los Colorados - Ecuador, 2008. p. 8 – 68.

WAMBECK, Noel. Sinopsis del proceso de la palma de aceite. Primera Edición. Colombia: Traducida al español por Guillermo Bernal, 2005. v. 1, p. 3-20.

ZAMBRANO, Carlos. Importancia de la desfrutación en el proceso de palma africana: examinación intrínseca. La Fortaleza-Puerto Rico, 1989. p. 10 – 11.

## ANEXOS

### ANEXO A. REPRESENTACIÓN DE UN CICLO DE ESTERILIZACIÓN

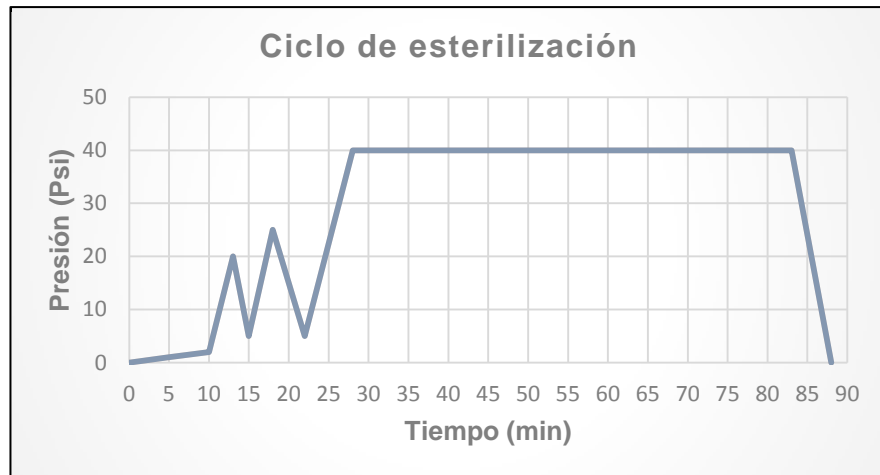


Figura 1- Anexo A. Ciclo de esterilización teórico manejado en Indupalma Ltda.

Fuente: Gestión de Documentación Indupalma Ltda. (Archivo)

Los principales pasos para llevar a cabo el ciclo de esterilización son:

**Desaireación:** se introduce vapor lentamente con el fin de empujar el aire hacia abajo y evacuarlo por las líneas de condensados.

**Ascenso y expansión en el primer y segundo picos:** se expulsa el aire residual que haya podido quedar en el esterilizador.

**Sostenimiento:** es en este paso donde realmente se alcanzan los objetivos principales de la esterilización. La presión y el tiempo juegan un papel importante.

**Expansión final y operaciones de descargue y cargue del esterilizador:** se descarga el equipo y se introduce la siguiente cochada.

## ANEXO B. CONCEPTO DE UNA LÍNEA DE OPERACIÓN

Para la operación de esterilización, se conoce como una línea de operación a cada una de las baterías de esterilizadores. Así bien, la planta cuenta con dos baterías de esterilización, cada una consta de tres esterilizadores con capacidad para ocho vagonetas de 2,5 toneladas de racimos, el esterilizador es un equipo tubular horizontal de aproximadamente 23,6 metros de largo y 2 metros de diámetro.



**Figura 1- Anexo B. Línea 2 de esterilización.**

Fuente: Indupalma Ltda.

## **ANEXO C. TÉCNICA ESPECÍFICA DE MUESTREO PARA LOS FACTORES ANALIZADOS EN ESTERILIZACIÓN**

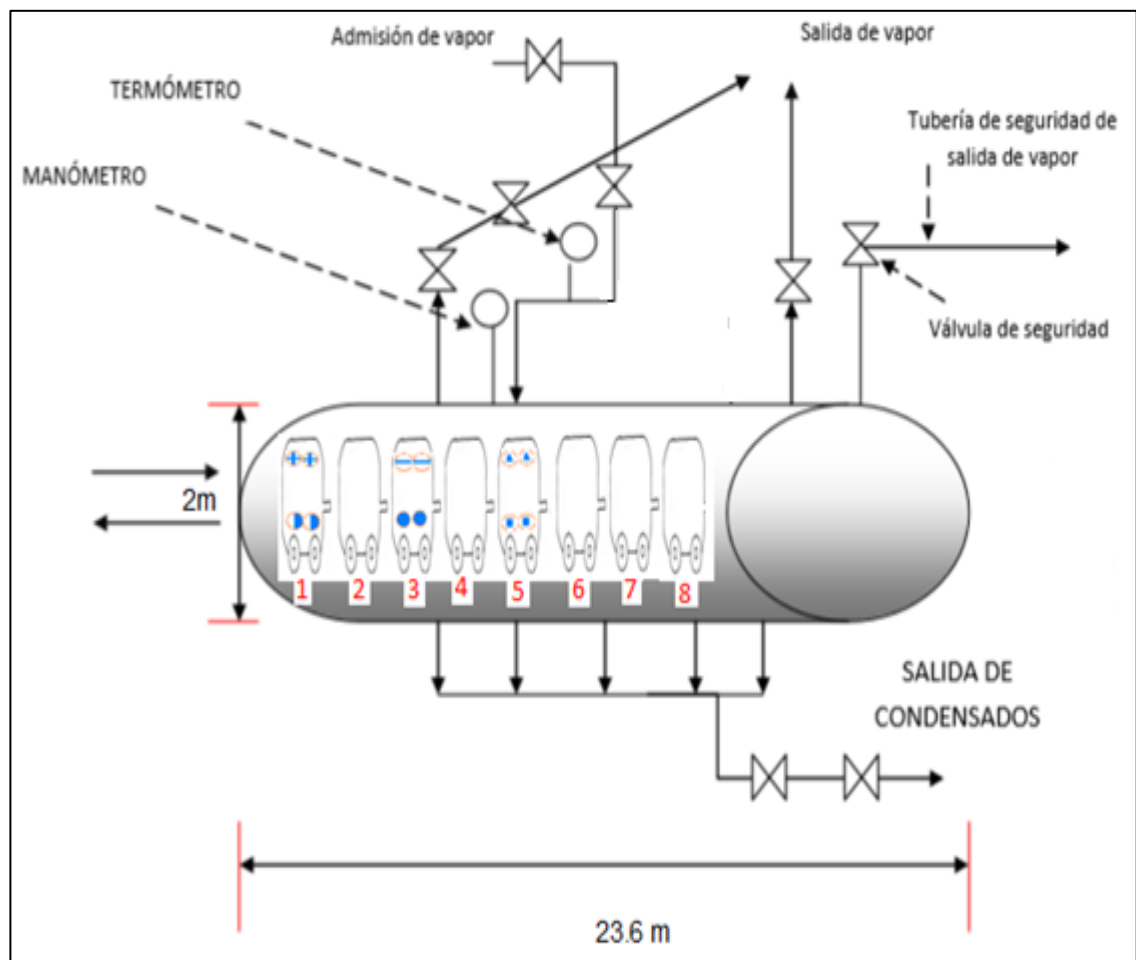
Para el primer factor mencionado, se evaluó la medida de carga de la vagoneta intermedia del esterilizador intermedio, tanto de la línea 1 como de la línea 2, llenándolas a diferentes alturas para dar un perfil de evaluación entre 60%, 75% y 100% de la capacidad total. Luego de terminado el proceso de esterilización se tomaron dos racimos, los cuales fueron desfrutados manualmente, muestreados y analizados por el procedimiento establecido en el laboratorio, con el fin de determinar el aceite impregnado en tusas.

Para el segundo factor, se realizaron varias corridas cambiando la frecuencia de alimentación del dosificador de racimos al desfrutador por medio de un variador de frecuencia, el cual estaba directamente relacionado con la esterilla dosificadora. Se realizaron además mediciones del tiempo de residencia de racimos en el desfrutador. Se realizó muestreo de tusas al final del proceso de desfrutado para estimar el contenido de aceite impregnado en tusas y el fruto adherido remanente en tusas.

La metodología de muestreo para el tercer factor, se redujo a ejecutarlo en una sola línea (1) debido a la complejidad de las muestras durante la medición. Para tal fin, se colocaron dos racimos tanto en la ubicación superior como en la inferior de las vagonetas 1,3 y 5 del esterilizador 1-línea 1 (Figura 1 - Anexo B). De esta manera se podría conocer el cambio en la pérdida tanto en las posiciones superiores e inferiores, como también lo sucedido a lo largo del autoclave. Luego de terminado el proceso de esterilización se tomaron dos racimos, los cuales fueron desfrutados manualmente, muestreados y analizados por el procedimiento establecido en el laboratorio, con el fin de determinar el aceite impregnado en tusas y el fruto adherido remanente.

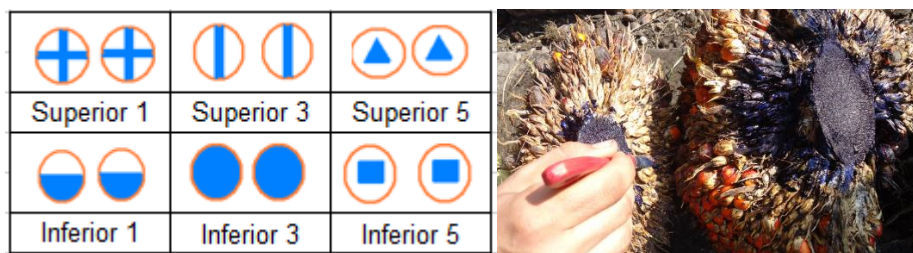
Para el último factor, se utilizó el esterilizador 1-línea 1, vagoneta 5, dentro de la cual se colocaron 3 racimos (para cada ensayo) en la parte intermedia de la misma; se realizaron aproximadamente 60 experimentos para poder clasificarlos según los rangos de presión que se quería evaluar, manteniendo constante los tiempos de 40, 50 y 60 minutos en cada caso. Luego de terminado el proceso de esterilización, se recuperaban los racimos (marcados con azul de metileno) y se llevaban al laboratorio para su respectivo análisis.

Figura 1 - Anexo C. Ubicación de racimos en las vagonetas y en el esterilizador



Fuente: Autor

**Figura 2 – Anexo C. Formas de marcado para diferenciar los racimos**



**Tabla 1 – Anexo C. Convención de las ubicaciones**

Ubicación	Significado
1,1	Parte superior de la vagoneta 1
1,2	Parte inferior de la vagoneta 1
3,1	Parte superior de la vagoneta 3
3,2	Parte inferior de la vagoneta 3
5,1	Parte superior de la vagoneta 5
5,2	Parte inferior de la vagoneta 5

## ANEXO D. DETERMINACIÓN DE ACEITE EN TUSA

1. Pesar una cápsula vacía, limpia y seca.
2. Acondicionar en la cápsula papel celulosa (filtro). El papel celulosa debe estar libre de humedad.
3. Pesar porciones de pedúnculo y espigas hasta un total de  $10 \pm 0,5$  gramos, de forma proporcional a la composición de la tusa.
4. Secar en horno eléctrico ( $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ) por mínimo 6 horas.
5. Dejar enfriar en desecador por 30 minutos y pesar.
6. Envolver la muestra e papel celulosa (o papel filtro) elaborando un dedal (cartucho).
7. Pesar un balón de fondo plano, limpio, seco y frío.
8. Llenar el balón con solvente (hexano) a máximo  $\frac{3}{4}$  de su capacidad.
9. Dar inicio a la extracción Soxhlet. Dejar extraer durante mínimo 4 horas.
10. Retirar el balón con el aceite extraído e introducirlo en el horno a  $105^{\circ}\text{C}$  hasta eliminar el solvente remanente (20-30 minutos).
11. Retirado el solvente enfriar el balón en el desecador durante 30 minutos aproximadamente. Pesar el balón en la balanza analítica.
12. Registrar el peso en el formato establecido

Para realizar el cálculo:

$$\% = \text{Aceite} / \text{SSNA} = (\text{Aceite} / (\text{muestra húmeda} - \text{aceite} - \text{agua})) * 100$$

**Figura 1- Anexo D. Montaje de las muestras para extracción mediante Soxhlet.**



## ANEXO E. DETERMINACIÓN DE ACEITE FRUTO ADHERIDO A TUSA

1. Pesar los frutos adheridos a la tusa
2. Pesar las nueces
3. Pesar una cápsula vacía, limpia y seca
4. Acondicionar en la cápsula papel celulosa (filtro). Pesar
5. Pesar  $10 \pm 0,5$  g del mesocarpio separado
6. Secar en horno eléctrico a  $(103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C})$  por mínimo 6 horas
7. Dejar enfriar en desecador por 30 minutos y pesar
8. Envolver la muestra en papel celulosa (o papel filtro) elaborando un dedal (cartucho)
9. Pesar un balón de fondo plano, limpio, seco y frío.
10. Llenar el balón con solvente (hexano) a máximo  $\frac{3}{4}$  de su capacidad.
11. Dar inicio a la extracción Soxhlet. Dejar extraer durante mínimo 4 horas.
12. Retirar el balón con el aceite extraído e introducirlo en el horno a  $105^{\circ}\text{C}$  hasta eliminar el solvente remanente (20-30 minutos).
13. Retirado el solvente enfriar el balón en el desecador durante 30 minutos aproximadamente. Pesar el balón en la balanza analítica.
14. Registrar el peso en el formato establecido

Para realizar el cálculo:

- $\% \text{ Aceite/ frutos adheridos} = (\text{Aceite/muestra húmeda}) * 100 = ((\text{fruto adherido-nueces})/\text{fruto adherido}) * 100$
- $\% \text{ Fruto adherido/tusa} = (\text{fruto adherido} / \text{racimos mal desfrutados (g)}) * \text{número de racimos mal desfrutados}$

## ANEXO F. MUESTREO EN LA OPERACIÓN DE CLARIFICACIÓN

Figura 1-Anexo F. Esquema de los equipos donde se realizó el muestreo en la operación de clarificación.

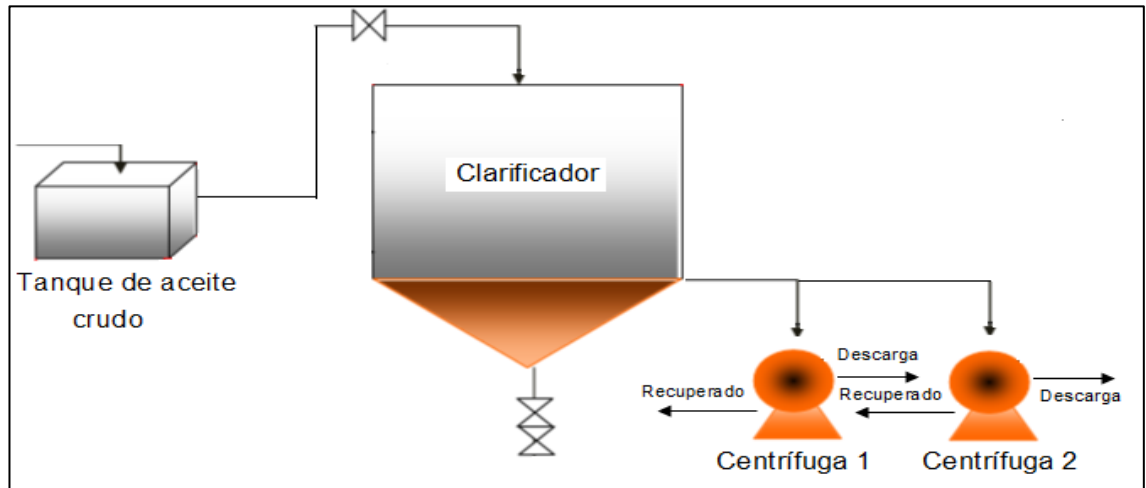


Tabla 1-Anexo F .Variables a relacionar en la etapa de clarificación estática

Clarificador 1	
LAC1	%vol. Aceite
LLC1	%vol. Lodos livianos
AGC1	%vol. Agua
LPC1	%vol. Lodos pesados
Centrifuga 1	
ACSSD1	%peso aceite/ssna
SSD1	Sólidos secos en descarga
LLRD1	% vol. Lodos livianos en recuperado
LPRD1	% vol. Lodos pesados en recuperado
ACRD1	% vol. Aceite en recuperado
LPDD1	% vol. Lodos pesados en descarga
ARFFD1	% peso aceite/RFF
AGLD1	g/L de aceite en descarga
Centrifuga 2	
ACSSD2	%peso aceite/ssna
SSD2	Sólidos secos en descarga
LLRD2	% vol. Lodos livianos en recuperado
LPRD2	% vol. Lodos pesados en recuperado
ACRD2	% vol. Aceite en recuperado
LPDD2	% vol. Lodos pesados en descarga
ARFFD2	% peso aceite/RFF
AGLD2	g/L de aceite en descarga
Tanque de aceite crudo	
ACCR	% vol. Aceite en crudo
LLCR	% vol. Lodos livianos en crudo
AGCR	% vol. Agua en crudo
LPCR	% vol. Lodos pesados en crudo
AGLP	Relación agua/lodos pesados en crudo
ACAG	Relación aceite/agua en crudo

## ANEXO G. DETERMINACIÓN DE ACEITE EN LODOS

1. Pesar una cápsula vacía, limpia y seca.
2. Acondicionar en la cápsula papel celulosa (filtro) más una porción de algodón. Pesar
3. Utilizando una probeta, medir:  
50 mL de muestra para efluentes totales.  
30 mL de muestra para lodos de centrifuga
4. Verter totalmente el volumen de muestra medido en la cápsula. Pesar
5. Secar en horno eléctrico a  $(103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C})$  por mínimo 6 horas
6. Dejar enfriar en desecador por 30 minutos y pesar
7. Envolver la muestra en papel celulosa (o papel filtro) elaborando un dedal (cartucho)
8. Pesar un balón de fondo plano, limpio, seco y frío.
9. Llenar el balón con solvente (hexano) a máximo  $\frac{3}{4}$  de su capacidad.
10. Dar inicio a la extracción Soxhlet. Dejar extraer durante mínimo 4 horas.
11. Retirar el balón con el aceite extraído e introducirlo en el horno a  $105^{\circ}\text{C}$  hasta eliminar el solvente remanente (20-30 minutos).
12. Retirado el solvente enfriar el balón en el desecador durante 30 minutos aproximadamente. Pesar el balón en la balanza analítica.
13. Registrar el peso en el formato establecido

Para realizar el cálculo:

$$\% \text{Aceite/SSNA} = (\text{Aceite} / (\text{muestra húmeda} - \text{aceite} - \text{agua})) * 100$$

## ANEXO H. DETERMINACIÓN DE ANÁLISIS RÁPIDOS

1. Tomar una de las muestras y agitar vigorosamente en el recipiente
2. Inmediatamente llenar un tubo de ensayo hasta 10 mL. Los tubos deben estar previamente identificados para evitar confusiones y errores. Ubicar el tubo de ensayo en la centrífuga
3. Repetir este procedimiento para cada una de las muestras tomadas o hasta completar la capacidad de la centrífuga, ubicándolas en su respectivo orden de proceso. La ubicación ordenada evita confusiones
4. Centrifugar como mínimo a 3000 rpm durante tres minutos
5. Pasados los tres minutos, destapar la centrífuga y proceder a realizar las lecturas en el mismo orden de ingreso de los tubos. Leer el volumen de cada una de las fases separadas a saber:
  - Aceite
  - Lodos livianos
  - Agua
  - Lodos pesados
6. Registrar la lectura en el formato respectivo. Si no se observa fase aceitosa después de realizada la centrifugación, reportar el resultado como trazas (T).

**Figura 1- Anexo H. Lectura de las fases separadas en volumen.**



## ANEXO I. PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE CAUDALES EN LAS CENTRÍFUGAS.

### ***Puntos de muestreo***

***Recuperado:*** Se contabilizó el tiempo en que un recipiente previamente aforado se llenaba, el cual era colocado en el extremo de la tubería por donde sale el aceite recuperado de la centrífuga.

***Alimentación:*** Se coordinó para apagar por un momento la bomba que alimenta el tanque de lodos, el cual a su vez alimenta a las desludadoras. Dicho tanque cuenta con un flotador instalado en la parte superior. Así bien, se podía medir el tiempo que demoraba el nivel en desplazarse 20 cm. Con estos datos y sabiendo que la geometría del tanque corresponde a un cilindro, se obtuvo el caudal de entrada a la centrífuga.

$$Q = \frac{\text{Volumen}}{\text{tiempo}} = \frac{\pi}{2} r^2 h \quad [\text{Ec. 1.1}]$$

Donde:

r = Radio del tanque de lodos

h = Altura desplazada por el flotador

t = Tiempo que tarda el flotador en desplazarse

Con este procedimiento se obtenía el caudal total, el cual servía como indicador para los cálculos siguientes, sin embargo era necesario conocer el flujo de entrada individual de las dos centrífugas a estudiar. Para ello, se utilizó un flujómetro electrónico.

**Descarga:** Como en este punto no había ningún sistema de medición, era necesario diseñar un vertedero, para observar el nivel y con las ecuaciones de diseño poder calcular el caudal correspondiente.

**Diseño del vertedero** Debido a la estructura del lugar, temperatura del fluido a medir y alto volumen de descarga, no era adecuado medir esta corriente con recipientes. Por esta razón, fue necesaria la elaboración de un sencillo vertedero.

Los vertederos son dispositivos sencillos, de bajo costo de construcción y mantenimiento, y amplio rango de medición, usados para estimar caudales en fluidos especiales. Un vertedero de pared delgada, consiste básicamente en una lámina plana, rígida, colocada perpendicular a la dirección del flujo y al fondo del canal [17].

El vertedero permite conocer el caudal de descarga en cualquier momento a través de la lectura del nivel, la cual está relacionada con el caudal a través de una ecuación específica. Este se diseñó de forma rectangular, obedeciendo a las indicaciones de la literatura y teniendo en cuenta el flujo aproximado a medir.

**Figura 1 – Anexo I. Vertedero rectangular para medición de flujos volumétricos**



Para cortes rectangulares angostos ( $h_o > L$ ) da el 93% de la descarga prevista por la fórmula de Francis [18]. De este modo, se aplica:

$$q = 0.386 L h_o^{1.5} \sqrt{2g} \quad [\text{Ec. 1.2}]$$

donde:

$q$  = Caudal [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$L$  = Longitud de la cresta

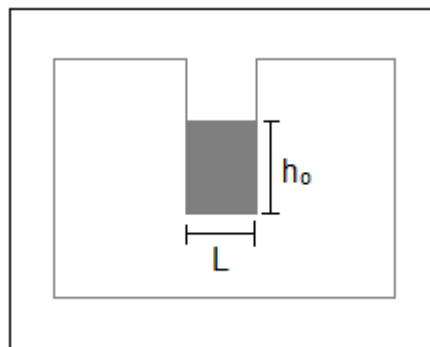
$h_o$  = Carga del vertedero

$g$  = Aceleración local debido a la gravedad

Partiendo de la ecuación 2.2 y conociendo que el caudal promedio de la descarga de las centrífugas estaría entre los 3000 y 5000 L/h, se escogió arbitrariamente  $L$  (1cm), se evaluó la ecuación en los dos extremos de los caudales y se supo cuál era el valor máximo y mínimo para  $h_o$ . Sabiendo estos datos, se procedió a diseñar la geometría del vertedero.

El vertedero se aforó con agua y luego con lodos para darle a la escala de nivel, un valor de caudal por cada altura.

**Figura 2 – Anexo I. Vertedero rectangular diseñado**



Fuente: Autor

**ANEXO J. ANÁLISIS DE VARIANZA ANOVA PARA LOS FACTORES  
EVALUADOS EN LA ETAPA DE ESTERILIZACIÓN**

**Tabla 1-Anexo J. Análisis de varianza para la pérdida por impregnación en tusa debido a las diferentes alturas de llenado de la vagoneta de esterilización**

Fuente	N	Media	Error típico	Intervalo de confianza para la media al 95%		Mínimo	Máximo
				Límite Inferior	Límite Superior		
h1: 80	10	5,2318	69,3251	2,2878	7,1436	2,535	6,645
h2: 100	10	8,0435	68,7223	4,3706	11,3085	4,897	10,656
h3: 150	10	9,6022	68,5524	6,0283	14,4281	6,941	13,32
Total	30	7,6258					

**Tabla 2-Anexo J. Análisis de varianza para la pérdida por impregnación en tusa debido a las diferentes frecuencias de dosificación**

Fuente	N	Media	Error típico	Intervalo de confianza para la media al 95%		Mínimo	Máximo
				Límite Inferior	Límite Superior		
f1: 20	10	6,8514	106,1389	4,6388	8,7421	5,124	8,152
f2: 25	10	11,1469	105,8887	6,6682	15,9337	7,489	15,102
f3: 30	10	9,6268	105,7223	6,2349	12,9089	7,223	11,893

**Tabla 3-Anexo J Análisis de varianza para la pérdida por impregnación en tusa debido a las diferentes posiciones de racimos en la vagoneta.**

Fuente	N	Media	Error típico	Intervalo de confianza para la media al 95%		Mínimo	Máximo
				Límite Inferior	Límite Superior		
Superior	5	3,7441	39,2546	3,7514	8,2645	4,1425	7,7290
Inferior	5	5,2726	38,2253	4,6999	9,0398	5,3886	8,5480
Total	10	4,50836					

**Tabla 4-Anexo J. Análisis de varianza para la pérdida por impregnación en tusa debido a las diferentes posiciones de racimos en el esterilizador.**

Fuente	N	Media	Error típico	Intervalo de confianza para la media al 95%		Mínimo	Máximo
				Límite Inferior	Límite Superior		
1	10	5,8360	27,6584	5,3908	9,3577	5,9541	8,7513
3	10	4,8373	27,2358	3,6917	7,7561	4,1322	7,3582
5	10	3,8517	26,8478	3,4554	7,4655	3,9984	6,8936
Total	30	4,5084					

**Tabla 5-Anexo J. Análisis de varianza para la pérdida por impregnación en tusa debido a los diferentes rangos de presión en el tercer pico de esterilización**

Fuente	N	Media	Error típico	Intervalo de confianza para la media al 95%		Mínimo	Máximo
				Límite Inferior	Límite Superior		
28-30	15	11,2788	101,3251	8,0661	16,0423	8,8990	15,0060
30-35	15	11,0207	101,4521	7,1523	13,3821	7,9860	12,6260
35-40	15	8,5646	102,2541	5,3564	11,2946	6,2110	10,4520
Total	45	10,2880					

**Tabla 6-Anexo J. Análisis de varianza para la pérdida por impregnación en tusa debido a los diferentes rangos de presión en el tercer pico de esterilización**

Fuente	N	Media	Error típico	Intervalo de confianza para la media al 95%		Mínimo	Máximo
				Límite Inferior	Límite Superior		
40	15	12,3313	104,3254	7,0603	13,4554	7,8430	12,5862
50	15	10,3870	104,5213	6,5669	12,1771	7,3250	11,5463
60	15	8,1458	105,2484	4,5025	10,3461	5,2112	9,5681
Total	45	10,2880					

## ANEXO K. TABLA DE CORRELACIÓN DE VARIABLES

**Tabla 1-Anexo K. Resultado estadístico de la correlación de todas las variables en clarificación.**

	LAC1	LLC1	AGC1	LPC1	ACSSD1	SSD1	LLRD1	LPRD1	ACRD1	LPDD1	ARFFD1	AGLD1	ACSSD2	SSD2	LLRD2	LPRD2	ACRD2	LPDD2	ARFFD2	AGLD2	ACCR	LLCR	AGCR	LPCR	AGLP	ACAG	
LAC1	1,000																										
LLC1	-0,168	1,000																									
AGC1	-0,398	-0,025	1,000																								
LPC1	-0,690	-0,086	-0,319	1,000																							
ACSSD1	-0,323	0,199	-0,024	0,283	1,000																						
SSD1	-0,271	-0,222	-0,037	0,360	-0,292	1,000																					
LLRD1	-0,177	-0,190	0,016	0,206	0,114	-0,118	1,000																				
LPRD1	-0,227	-0,013	0,162	0,094	-0,070	0,151	0,158	1,000																			
ACRD1	0,062	0,129	0,116	-0,145	-0,106	-0,018	-0,129	-0,387	1,000																		
LPDD1	-0,281	-0,295	0,321	0,190	0,189	0,024	0,151	0,215	-0,163	1,000																	
ARFFD1	-0,457	<b>0,416</b>	-0,044	0,460	0,877	0,198	0,044	0,000	-0,101	0,193	1,000																
AGLD1	-0,455	<b>0,411</b>	-0,044	0,460	0,881	0,191	0,045	-0,006	-0,109	0,196	0,999	1,000															
ACSSD2	-0,559	0,159	0,052	0,492	0,380	0,352	0,202	0,159	-0,255	0,146	0,546	0,542	1,000														
SSD2	0,074	-0,127	0,388	-0,389	-0,249	0,134	0,146	0,357	-0,103	0,024	-0,191	-0,189	-0,324	1,000													
LLRD2	-0,018	-0,056	0,351	-0,259	0,072	-0,414	0,270	0,427	-0,349	0,193	-0,142	-0,143	0,028	0,391	1,000												
LPRD2	-0,008	0,029	-0,381	0,252	0,104	-0,052	0,308	-0,288	-0,341	-0,178	0,051	0,060	0,155	-0,199	-0,127	1,000											
ACRD2	0,165	0,072	0,129	-0,254	-0,043	-0,108	-0,023	-0,282	0,907	-0,140	-0,090	-0,096	-0,296	0,026	-0,196	-0,336	1,000										
LPDD2	-0,176	0,146	0,365	-0,105	-0,015	0,042	0,104	-0,077	0,104	0,153	0,012	0,006	0,065	0,031	0,065	0,131	0,085	1,000									
ARFFD2	-0,513	<b>0,468</b>	0,312	0,238	0,208	0,469	0,251	0,386	-0,297	0,191	0,427	0,423	0,770	0,339	0,210	0,020	-0,249	0,096	1,000								
AGLD2	-0,513	<b>0,452</b>	0,313	0,237	0,208	0,468	0,251	0,386	-0,297	0,192	0,426	0,423	0,769	0,340	0,211	0,020	-0,249	0,096	1,000	1,000							
ACCR	0,278	0,037	0,045	-0,334	0,042	-0,536	0,014	-0,152	0,034	0,109	-0,234	-0,224	-0,408	0,215	0,159	-0,111	0,183	-0,108	-0,243	-0,241	1,000						
LLCR	-0,101	<b>0,620</b>	-0,381	0,464	0,405	0,338	-0,056	0,086	-0,010	0,222	0,182	<b>0,385</b>	0,413	-0,294	-0,042	0,115	-0,121	-0,214	0,137	<b>0,401</b>	-0,453	1,000					
AGCR	-0,205	<b>-0,442</b>	0,374	-0,093	-0,241	0,384	-0,134	0,108	0,079	-0,184	-0,036	-0,043	0,217	0,071	-0,004	-0,013	-0,029	0,287	0,223	0,223	-0,752	-0,023	1,000				
LPCR	-0,109	-0,069	-0,536	0,579	0,263	0,177	0,244	0,059	-0,167	-0,015	0,346	0,343	0,175	-0,376	-0,278	0,188	-0,210	-0,221	-0,043	-0,045	-0,291	0,392	-0,354	1,000			
AGLP	-0,105	0,048	0,528	-0,343	-0,277	0,173	-0,209	0,042	0,151	-0,154	-0,179	-0,183	0,056	0,265	0,133	-0,104	0,106	0,301	0,184	0,184	-0,373	-0,262	0,879	-0,744	1,000		
ACAG	0,279	0,105	-0,280	-0,089	0,184	-0,433	0,045	-0,059	-0,069	0,127	-0,042	-0,034	-0,291	0,050	0,045	-0,081	0,065	-0,247	-0,226	-0,225	0,102	0,102	-0,942	0,127	-0,711	1,000	
MEDIA	<b>4,39</b>	<b>5,38</b>	<b>58,21</b>	<b>24,78</b>	16,14	5,66	10,93	18,73	16,17	23,63	0,91	9,07	13,37	5,42	12,70	11,23	18,50	20,13	0,72	7,20	49,03	<b>4,43</b>	<b>24,67</b>	20,77	<b>2,50</b>	<b>1,40</b>	
DIESVES	3,49	0,72	2,48	3,24	3,62	0,63	3,96	3,54	7,48	3,40	0,19	1,88	1,97	0,52	4,76	5,55	8,22	4,79	0,11	1,07	5,43	1,41	5,07	3,00	0,35	0,65	
MAX	23,00	7,00	65,00	33,00	24,37	7,36	20,00	25,00	40,00	34,00	126	12,64	17,34	6,36	28,00	25,00	48,00	30,00	0,99	9,88	60,00	7,00	35,00	26,00	2,06	3,80	
MIN	5,00	3,00	59,00	19,00	10,37	4,76	5,00	11,00	9,00	20,00	0,54	5,38	8,19	4,29	6,00	3,00	10,00	11,00	0,46	4,58	40,00	3,00	15,00	16,00	0,63	1,28	

## ANEXO L. RESULTADOS ESTADÍSTICOS DE LOS BALANCES DE MASA EN CENTRIFUGACIÓN

Balance de masa para la apertura de la válvula de recuperado de 2900 L/h  
(Centrífuga No. 1):

Inicialmente se tomó una densidad aproximada ( $\rho = 1$ ) para todas las corrientes, debido al alto porcentaje de agua que estas presentan.

Los siguientes son datos calculados experimentalmente:

$$Q_e = 7919,9 \text{ L/h}$$

$$Q_s = 5323,95 \text{ L/h}$$

$$Q_r = 2881,25 \text{ L/h}$$

$$\% \text{Aceite}_e = 9,31$$

$$\% \text{Aceite}_s = 0,86$$

$$\% \text{SSNA}_e = 5,69$$

$$\% \text{SSNA}_s = 5,43$$

$$\% \text{Agua}_e = 85$$

$$\% \text{Agua}_s = 93,71$$

Se sabe que  $F = Q \cdot \rho$  **[Ec. 2.1]**

$$F_e = 7919,9 \text{ Kg/h}$$

$$F_s = 5323,95 \text{ Kgh}$$

$$F_r = 2881,25 \text{ Kg/h}$$

Por retroceso se calcula el flujo de la corriente de entrada ( $F_e$ )

$$F_e = F_r + F_s \quad \text{[Ec. 2.2]}$$

$$F_e = 2881,25 + 5323,95 = 8205,2 \text{ Kg/h}$$

Al comparar el caudal de entrada calculado en este balance con el hallado experimentalmente se observa un exceso, el cual es atribuido al agua de sello que interviene en la centrifugación, así:

$$F_{\text{ agua de sello}} = F_e \text{ calculado} - F_e \text{ experimental} \quad \text{[Ec. 2.3]}$$

$$F_{\text{ agua de sello}} = 285,3 \text{ Kg/h}$$

Para calcular la composición de la corriente de recuperado se realizan los siguientes balances:

Balance de aceite:

$$F_e * (\% \text{Aceite}_e) = F_r * (\% \text{Aceite}_r) + F_s * (\% \text{Aceite}_s) \text{ se despeja } F_r * (\% \text{Aceite}_r)$$

$$F_r * (\% \text{Aceite}_r) = F_e * (\% \text{Aceite}_e) - F_s * (\% \text{Aceite}_s)$$

$$\% \text{Aceite}_r = 24,07$$

Balance de sólidos secos no aceitosos:

$$F_e * (\% \text{SSNA}_e) = F_r * (\% \text{SSNA}_r) + F_s * (\% \text{SSNA}_s) \text{ se despeja } F_r * (\% \text{SSNA}_r)$$

$$F_r * (\% \text{SSNA}_r) = F_e * (\% \text{SSNA}_e) - F_s * (\% \text{SSNA}_s)$$

$$\% \text{SSNA}_r = 5,61$$

Balance de agua:

$$F_{\text{ agua total que sale}} = F_{\text{ agua que entra}} + F_{\text{ agua de sello}}$$

$$F_{\text{ agua total que sale}} = 6731,91 + 285,3 = 7017,21 \text{ Kg/h}$$

Tabla 1-Anexo L Resultados estadísticos de los balances de masa para la centrífuga 1

Apertura del 25% (1200 L/h)				Apertura del 50% (1800 L/h)			
	Recuperado	Entrada	Salida		Recuperado	Entrada	Salida
Q (L/h)	1203,96	6123,6	5217,78	Q (L/h)	1794,07	6721,9	5264,33
% Aceite	29,04	6,84	1,33	% Aceite	20,32	6,44	1,31
Aceite Total (L/h)	349,63	419,02	69,39	Aceite Total (L/h)	364,55	433,51	68,96
% SSNA	4,02	5,91	6,01	% SSNA	5,31	6,05	5,92
SSNA Total (L/h)	48,40	361,99	313,59	SSNA Total (L/h)	95,26	406,91	311,65
% Agua	66,94	87,25	92,66	% Agua	74,37	87,51	92,77
Agua Total (L/h)	805,93	5342,84	4834,79	Agua Total (L/h)	1334,25	5882,33	4883,72
Aguas Iodosas Totales (L/h)	854,33	5704,83	5148,38	Aguas Iodosas Totales (L/h)	1429,51	6289,24	5195,37

Apertura del 75% (2900 L/h)				Apertura del 100% (4300 L/h)			
	Recuperado	Entrada	Salida		Recuperado	Entrada	Salida
Q (L/h)	2881,25	7919,9	5323,95	Q (L/h)	4272,68	8564,2	5798,75
% Aceite	24,01	9,31	0,86	% Aceite	15,12	8,20	0,98
Aceite Total (L/h)	691,79	737,57	45,78	Aceite Total (L/h)	646,03	702,86	56,83
% SSNA	5,61	5,69	5,43	% SSNA	5,40	6,66	5,86
SSNA Total (L/h)	161,64	450,73	289,09	SSNA Total (L/h)	230,72	570,53	339,81
% Agua	70,38	85	93,71	% Agua	79,48	85,14	93,16
Agua Total (L/h)	2027,82	6731,91	4989,07	Agua Total (L/h)	3395,93	7291,56	5402,11
Aguas Iodosas Totales (L/h)	2189,46	7182,64	5278,16	Aguas Iodosas Totales (L/h)	3626,65	7862,09	5741,92

Tabla 2-Anexo L Resultados estadísticos de los balances de masa para la centrífuga 2

Apertura del 25% (6700 L/h)				Apertura del 50% (1100 L/h)			
	Recuperado	Entrada	Salida		Recuperado	Entrada	Salida
Q (L/h)	663,87	3692,3	3308,63	Q (L/h)	1065,54	3992,3	3337,56
% Aceite	32,28	7,07	1,41	% Aceite	20,82	6,73	1,40
Aceite Total (L/h)	214,30	261,04	46,74	Aceite Total (L/h)	221,84	268,68	46,84
% SSNA	5,03	7,09	6,90	% SSNA	4,00	5,1	4,82
SSNA Total (L/h)	33,39	261,78	228,39	SSNA Total (L/h)	42,62	203,61	160,99
% Agua	62,69	85,84	91,69	% Agua	75,18	88,17	93,78
Agua Total (L/h)	416,18	3169,47	3033,68	Agua Total (L/h)	801,07	3520,01	3129,96
Aguas Iodosas Totales (L/h)	449,57	3431,25	3262,07	Aguas Iodosas Totales (L/h)	843,69	3723,62	3290,95

Apertura del 75% (1900 L/h)				Apertura del 100% (3000 L/h)			
	Recuperado	Entrada	Salida		Recuperado	Entrada	Salida
Q (L/h)	1888,96	5192,3	3419,14	Q (L/h)	2909,73	5832,3	3374,87
% Aceite	17,13	6,86	0,96	% Aceite	14,53	7,73	0,82
Aceite Total (L/h)	323,58	356,41	32,83	Aceite Total (L/h)	422,78	450,64	27,86
% SSNA	4,35	4,72	4,76	% SSNA	3,68	4,38	4,40
SSNA Total (L/h)	82,17	245,08	162,91	SSNA Total (L/h)	107,08	255,45	148,37
% Agua	78,52	88,42	94,28	% Agua	81,79	87,89	94,78
Agua Total (L/h)	1483,21	4591,03	3223,56	Agua Total (L/h)	2379,87	5126,01	3198,70
Aguas Iodosas Totales (L/h)	1565,38	4836,11	3386,47	Aguas Iodosas Totales (L/h)	2486,95	5381,46	3347,07

Figura 1-Anexo L. Influencia del agua de entrada sobre el agua de recuperado de las centrífugas.

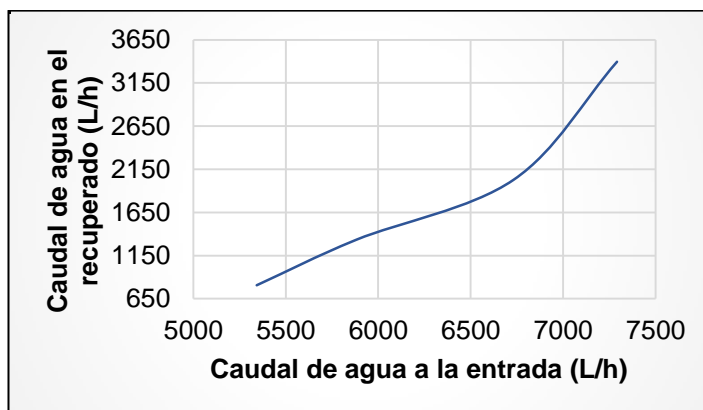


Figura 2-Anexo L. Influencia del agua de recuperado sobre las pérdidas de aceite y SSNA.

