

Evaluación de alternativas para mejorar la eficiencia de la etapa de esterilización en la extracción de aceite de palma en la empresa Palmeras de Puerto Wilches S.A

Jean Nicolay Garcia Camargo

Trabajo de Grado para optar el título de Ingeniero Químico

Director

Fredy Augusto Avellaneda Vargas

Ingeniero Químico, Ph. D

Codirectora

Viviana Sánchez Torres

Ingeniera Química, Ph. D

Tutor

Óscar Mauricio Díaz Rodríguez

Ingeniero Químico, MSc.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

Deseo dedicar este proyecto a mi familia como un reconocimiento a todo el apoyo que me han brindado durante mi formación académica. Han sido un pilar fundamental en mi vida y su amor incondicional ha sido una motivación constante para alcanzar mis metas.

Gracias por haberme enseñado los valores del esfuerzo, la perseverancia y la dedicación, valores que me han permitido alcanzar este logro académico. La formación que he recibido en casa, el amor y el apoyo que siempre me han brindado, son la base de mi éxito.

Espero que este proyecto pueda ser un pequeño agradecimiento por todo lo que han hecho por mí, y una muestra de que su sacrificio y esfuerzo no han sido en vano. Me siento orgulloso de poder compartir con ustedes este logro y espero que sientan el mismo orgullo por mí.

Agradecimientos

Agradezco a la empresa Palmeras de Puerto Wilches S.A por brindarme la oportunidad de realizar este proyecto y expandir mis conocimientos. Al ingeniero Oscar Diaz y la ingeniera Camila Quintero, así como a los profesores Fredy Avellaneda y Viviana Sánchez, por su apoyo, acompañamiento, colaboración y confianza durante la elaboración de este proyecto.

Tabla de contenido

	Pág.
Introducción.....	12
1. Objetivos.....	13
1.1 Objetivo general.....	13
1.2 Objetivos específicos.....	13
2. Marco conceptual.....	14
2.1 Generalidades del fruto de palma de aceite.....	14
2.2 Generalidades del proceso de extracción.....	15
2.3 Proceso de esterilización.....	15
2.3.1 Objetivos principales de la esterilización.....	15
2.3.2 Ciclos de esterilización.....	16
2.3.3 Aspectos técnicos.....	17
3. Metodología.....	19
3.1 Reconocimiento y diagnóstico del estado inicial de los equipos.....	20
3.2 Definición de los nuevos rangos de operación y modificaciones operativas.....	20
3.3 Evaluación de los cambios propuestos.....	21
4. Resultados y análisis.....	23
4.1 Reconocimiento y diagnóstico del sistema de fracturación y esterilización.....	23
4.1.1 Fracturador de RFF.....	23
4.1.2 Sistema de esterilización inclinada.....	24
4.2 Evaluación de los cambios propuestos.....	27
4.2.1 Fracturador de RFF.....	27

4.2.1.1	Porcentaje de RFF fracturados	27
4.2.1.2	Concentración de AGL en el aceite extraído de los RFF fracturados.....	28
4.2.2	Sistema de esterilización inclinada	30
4.2.2.1	Humedad del mesocarpio	30
4.2.2.2	Humedad de la almendra.....	32
4.2.2.3	Acidez del aceite	34
4.2.2.4	Aceite presente en condensados	36
4.2.2.5	Racimos mal desfrutados	38
4.2.2.6	Registro visual	40
4.2.2.7	Aspectos técnicos de los ciclos evaluados	41
4.2.2.8	Descarga de vapor.....	43
4.2.2.9	Análisis financiero	44
5.	Conclusiones	46
6.	Recomendaciones.....	47
	Bibliografía.....	48
	Apéndices	52

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Morfología del fruto de palma de aceite	14
Figura 2. Estructura de un ciclo de esterilización	16
Figura 3. Cuadro metodológico del proyecto	19
Figura 4. Fracturador de RFF de la empresa PPW	23
Figura 5. Sistema de esterilización inclinada de la empresa PPW	24
Figura 6. Cantidad de RFF fracturados antes y después de los ajustes realizados en el fracturador	27
Figura 7. Concentración de los AGL en el aceite de los RFF fracturados y sin fracturar del cultivar D×P.....	28
Figura 8. Concentración de los AGL en el aceite de los RFF fracturados y sin fracturar del cultivar O×G	29
Figura 9. Humedad presente en los mesocarpios esterilizados por efecto de la desaireación	30
Figura 10. Humedad presente en los mesocarpios esterilizados por efecto de los tiempos de sostenimiento	31
Figura 11. Humedad presente en las almendras esterilizadas por efecto de la desaireación	33
Figura 12. Humedad presente en las almendras esterilizadas por efecto de los tiempos de sostenimiento	33
Figura 13. Concentración de AGL del aceite de licor de prensa por efecto de la desaireación ...	35
Figura 14. Concentración de AGL del aceite de licor de prensa por efecto de los tiempos de sostenimiento	35
Figura 15. Cantidad de aceite presente en condensados por efecto de la desaireación	37

Figura 16. Cantidad de aceite presente en condensados por efecto de los tiempos de sostenimiento	37
Figura 17. Porcentaje de racimos mal desfrutados por efecto de la desaireación	39
Figura 18. Porcentaje de racimos mal desfrutados por efecto del tiempo de sostenimiento.....	39
Figura 19. Instalación de una nueva línea para la evacuación de vapor contenido en las autoclaves	43
Figura 20. Tiempo requerido para la descarga de vapor bajo la influencia de la nueva línea de evacuación.	44

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Tiempos empleados en los ciclos de esterilización en la empresa PPW durante el año 2021.....	25
Tabla 2. Parámetros técnicos de los ciclos de esterilización empleados en la empresa PPW durante el año 2021	26
Tabla 3. Registro visual de la coloración de las almendras esterilizadas del cultivar D×P	41
Tabla 4. Aspectos técnicos de los ciclos de esterilización evaluados para el cultivar D×P	41
Tabla 5. Aspectos técnicos de los ciclos de esterilización evaluados para el cultivar O×G	42
Tabla 6. Análisis financiero del aumento de capacidad de esterilización logrado en el presente proyecto	45

Lista de apéndices

Apéndice A. Proceso de extracción de APC, AP y TP en la empresa PPW	52
Apéndice B. Determinación de la humedad para muestras mesocarpio esterilizado.....	53
Apéndice C. Determinación de la humedad para muestras de almendras esterilizadas.....	54
Apéndice D. Determinación de la concentración de AGL en el aceite de muestras de licor de prensa de racimos esterilizados.....	55
Apéndice E. Determinación de la cantidad de aceite presente en muestras de condensados de esterilización	56
Apéndice F. Análisis estadístico de las variables analizadas en los ciclos de esterilización	57

Resumen

Título: Evaluación de alternativas para mejorar la eficiencia de la etapa de esterilización en la extracción de aceite de palma en la empresa Palmeras de Puerto Wilches S.A.*

Autor: Jean Nicolay Garcia Camargo **

Palabras claves: Aceite de palma, esterilización, fracturación, autoclave, D×P, O×G.

Descripción:

La empresa Palmeras de Puerto Wilches S.A se dedica al cultivo, cosecha y producción de diversos productos derivados de la palma de aceite, tales como el aceite de palma, aceite de palmiste y torta de palmiste, entre otros. Durante el proceso de extracción, la etapa de esterilización se considera fundamental, ya que detiene el proceso de acidificación, acelera el desprendimiento de los frutos, facilita la extracción del aceite ablandando los tejidos de la pulpa, esteriliza el fruto de microorganismos, coagula las proteínas y descompone el material mucilaginoso. En el sistema de esterilización inclinada, se realizó un diagnóstico donde se identificaron tiempos extensos que limitaban la capacidad a un rango de 37 a 40 toneladas de racimos de fruta fresca (RFF) por hora. Para abordar esta situación, se llevó a cabo una evaluación de alternativas operativas para esta etapa del proceso por medio de ajustes, tales como la reducción de los tiempos de desaireación y sostenimiento, así como la implementación de nuevas líneas de descarga de vapor en cada autoclave. Como resultado, estos cambios generaron un aumento del 22.21% en la capacidad de esterilización para los RFF provenientes del cultivar de palma africana tipo *tenera* D×P (Dura × Pisifera) de *Elaeis guineensis* Jacq., y del 20.16% para el cultivar híbrido interespecífico O×G (*Elaeis oleifera* (Kunth) Cortés × *Elaeis guineensis* Jacq), origen Coarí × La Mé. Este aumento de capacidad de esterilización representa un ingreso económico adicional estimado de \$ 241,475,221.53 COP por cada día de producción. Adicionalmente, se incrementó un 13.8% la cantidad de RFF fracturados mediante las modificaciones operativas realizadas en el fracturador, y se evaluó el comportamiento de la concentración de ácidos grasos libres en los racimos fracturados, implementando buenas prácticas que previenen el incremento de la acidez en el aceite de palma crudo.

*Trabajo de grado

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Ingeniero Químico. Ph.D. Fredy Augusto Avellaneda Vargas. Codirectora: Ingeniera Química, Ph.D Viviana Sánchez Torres, Tutor: Ingeniero Químico. MSc. Óscar Mauricio Díaz Rodríguez

Abstract

Title: Evaluation of alternatives to improve the efficiency of the sterilization stage in palm oil extraction in the Palmeras de Puerto Wilches S.A. company*

Author: Jean Nicolay Garcia Camargo **

Keywords: Palm oil, sterilization, fracturing, autoclave, D×P, O×G.

Description:

Palmeras de Puerto Wilches S.A. is a company dedicated to the cultivation, harvesting, and production of various products derived from oil palm, such as palm oil, palm kernel oil, and palm kernel cake, among others. During the extraction process, the sterilization stage is considered crucial because it stops the acidification process, accelerates the detachment of fruits, facilitates oil extraction by softening the pulp tissues, sterilizes the fruit from microorganisms, coagulates proteins and decomposes mucilaginous material. In the inclined sterilization system, a diagnosis was carried out, identifying extended times that limited the capacity to a range of 37 to 40 tons of fresh fruit bunches (FFB) per hour. To address this situation, an evaluation of operational alternatives for this stage of the process was carried out through adjustments, such as reducing deaeration and sustainment times, as well as implementing new steam discharge lines in each autoclave. As a result, these changes resulted in a 22.21% increase in sterilization capacity for FFB from the *tenera* D×P African palm cultivar (*Dura* × *Pisifera*) of *Elaeis guineensis* Jacq., and a 20.16% increase for the inter-specific hybrid O×G cultivar (*Elaeis oleifera* (Kunth) Cortés × *Elaeis guineensis* Jacq), Coarí × La Mé origin. This increase in sterilization capacity represents an estimated additional economic income of COP \$241,475,221.53 for each day of production. Additionally, the amount of FFB fractured was increased by 13.8% through the operational modifications made to the fracturing machine, and the behavior of the concentration of free fatty acids in the fractured bunches was evaluated, implementing good practices that prevent the increase of acidity in the crude palm oil.

*Bachelor Thesis

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director: Chemical Engineer. Ph.D. Fredy Augusto Avellaneda Vargas. Co-director: Chemical Engineer, Ph.D. Viviana Sánchez Torres. Tutor: Chemical Engineer. MSc. Óscar Mauricio Díaz Rodríguez.

Introducción

Palmeras de Puerto Wilches S.A (PPW) es una empresa con más de 30 años de experiencia en el sector palmicultor. Sus principales actividades son la cosecha del fruto de palma de aceite, la extracción y comercialización de aceite de palma crudo (APC), aceite de palmiste crudo (AP), torta de palmiste (TP) y otros productos derivados. La empresa está ubicada en el Km 8 de la vía a Puerto Wilches, Santander. Cuenta con una capacidad de procesamiento de 45 toneladas de RFF por hora, con la posibilidad de expandirse a 60 toneladas de RFF por hora. En el año 2021, la empresa procesó 171,878.26 toneladas de RFF, lo que se traduce en una extracción de 36,281.49 toneladas de APC (21.1%), 4,442.93 toneladas de AP (2.58%) y 7,262.18 toneladas de TP (4.23%).

Después de la recepción de los RFF en la tolva, la esterilización es una de las etapas más importantes para el proceso de extracción del APC. Esta etapa consiste en someter los RFF a una cocción con el objetivo principal de acondicionarlos para facilitar la extracción del aceite presente en estos (Wambeck, 1999).

La etapa de esterilización se lleva a cabo mediante ciclos que constan de pasos secuenciales, en los que se introduce o expulsa vapor de agua en el interior de una autoclave durante un tiempo determinado (Ojeda Nitola, 1991).

Dado que la etapa de esterilización se realiza por baches y en equipos convencionales (esterilización horizontal), generalmente se presentan inconvenientes en la continuidad del proceso, lo que resulta en una disminución de la capacidad de procesamiento en las plantas extractoras. Por esta razón, la empresa Palmeras de Puerto Wilches S.A adquirió en el mes de febrero del año 2020, un sistema de esterilización inclinada, el cual cuenta con una capacidad de esterilización de 45 toneladas de RFF por, según las especificaciones dadas por el fabricante. Sin embargo, debido a la falta de un diagnóstico general y evaluación de alternativas en este sistema,

actualmente se registran tiempos de operación extensos, lo que se traduce en una menor capacidad de procesamiento y un aumento de las pérdidas de aceite de palma crudo en los efluentes. Por lo tanto, en este trabajo de grado en modalidad de práctica empresarial, se llevó a cabo un diagnóstico y una evaluación de alternativas operativas buscando mejorar la eficiencia de la etapa de esterilización en la empresa Palmeras de Puerto Wilches S.A.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Evaluar alternativas operativas para mejorar la eficiencia de la etapa de esterilización en el proceso de extracción de aceite de palma en la empresa Palmeras de Puerto Wilches S.A

1.2 Objetivos específicos

Realizar un diagnóstico del estado y operación de la etapa de esterilización y fracturación con el fin de conocer las condiciones iniciales del sistema.

Determinar la variación en la cantidad de racimos fracturados y la concentración de ácidos grasos libres debido a las modificaciones en las condiciones operativas de la etapa de fracturación.

Evaluar los efectos de la variación de los tiempos de desaireación y sostenimiento en función de las condiciones fisicoquímicas del fruto esterilizado, racimos mal desfrutados, aceite en condensados y en los aspectos técnicos de los ciclos de esterilización evaluados.

2. Marco conceptual

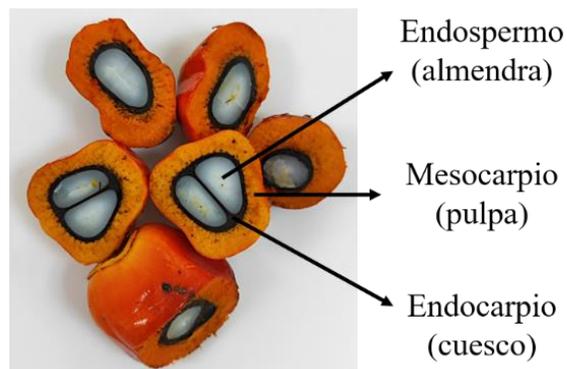
2.1 Generalidades del fruto de palma de aceite

La palma de aceite es una planta originaria de África que se ha convertido en una de las principales fuentes de aceites vegetales en el mundo. En Colombia, la palma de aceite es uno de los cultivos y actividades económicas más importantes, con una producción de 1.9 millones de toneladas de APC en el año 2021 (Fedepalma, 2022).

El fruto de palma de aceite está compuesto principalmente por el mesocarpio o pulpa, el cual contiene aceite de palma crudo. Seguidamente, se encuentra el endocarpio o cuesco, el cual protege la almendra. Por último, se encuentra el endospermo o almendra, el cual contiene aceite de palmiste (ver **Figura 1**) (Forero Hernández et al., 2012).

Figura 1.

Morfología del fruto de palma de aceite



Actualmente, Colombia es el primer productor de aceite de palma en América Latina y el cuarto a nivel mundial (Fedepalma, 2022b). Este producto se emplea principalmente como materia prima para la elaboración de aceite de cocina, biocombustibles y diversos productos alimenticios, entre otros (Roa Espitia et al., 2014).

2.2 Generalidades del proceso de extracción

Una vez que los RFF son cortados y transportados a las plantas de beneficio, se inicia el proceso de extracción del APC mediante procesos mecánicos y térmicos. Este proceso consta de las siguientes etapas: fracturación, esterilización, desfrutado, digestión, prensado, clarificación, secado y almacenamiento (Alvarado Tobias, 2010). El diagrama de procesamiento de la empresa PPW se observa en el **Apéndice A**.

2.3 Proceso de esterilización

La esterilización es un procedimiento mediante el cual los RFF se someten a una cocción utilizando vapor de agua, con el propósito de adecuar los racimos para facilitar el proceso de extracción del APC, AP y TP. Esta etapa se lleva a cabo en equipos cilíndricos denominados autoclaves, las cuales pueden ser horizontales, verticales o inclinadas. En este proceso se controlan tres factores principales: presión, temperatura y tiempo de cocción (Cala Gaitán & Bernal Castillo, 2008).

2.3.1 *Objetivos principales de la esterilización*

Los principales objetivos del proceso de esterilización son:

- **Inactivar la lipasa:** el proceso de descomposición del aceite ocurre debido a una reacción química en donde las moléculas grasas se rompen, dando lugar a ácidos grasos libres (AGL) y glicerol, por acción de la enzima llamada lipasa (Wambeck, 2007).
- **Facilitar el desprendimiento de los frutos unidos al raquis:** este desprendimiento se logra gracias a la evaporación del agua presente en los tejidos de la unión de los frutos con el raquis. Esto minimiza las pérdidas por fruto adherido en la etapa de desfrutamiento de los racimos esterilizados (Hamblin, 1991).

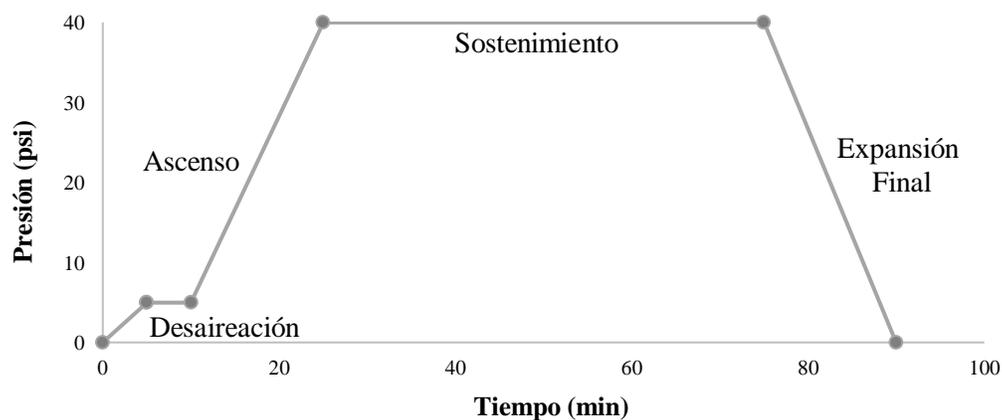
- **Ablandar los tejidos de la Pulpa:** este ablandamiento facilita el rompimiento de las celdas que contienen el aceite facilitando el proceso de digestión y prensado (Wambeck, 1999).
- **Calentar y deshidratar parcialmente las almendras:** esta deshidratación favorece el rompimiento de las nueces y la recuperación de las almendras para su posterior proceso (Cala Gaitán & Bernal Castillo, 2008).
- **Coagular las proteínas:** este proceso de coagulación reduce la emulsificación del aceite en el agua, evitando dificultades en la etapa de clarificación (Ojeda Nitola, 1991).
- **Hidrólisis y descomposición del material mucilaginoso:** se ha demostrado que, a temperaturas superiores a 120 °C, este material mucilaginoso (gomas) es hidrolizado, descompuesto o coagulado, evitando así la formación de sustancias coloidales (sustancias gelatinosas) que dificultan la etapa de clarificación (Yáñez Angarita et al., 2010).

2.3.2 Ciclos de esterilización

El proceso de esterilización se lleva a cabo mediante ciclos, en los que se realiza un aumento y disminución de presión y temperatura por medio de la adición o expulsión de vapor dentro de las autoclaves (ver **Figura 2**).

Figura 2.

Estructura de un ciclo de esterilización



Un ciclo de esterilización está conformado por los siguientes pasos:

1. **Desaireación:** el aire es una mezcla de gases que disminuyen el coeficiente de transferencia de calor, lo que afecta la operación de esterilización. Por lo tanto, se introduce lentamente vapor en el interior de las autoclaves con el fin de evacuar el aire por las líneas de condensados (Cala Gaitán & Bernal Castillo, 2008).
2. **Ascenso:** en esta etapa se introduce vapor de agua con el objetivo de expulsar el aire residual que no pudo ser evacuado en la desaireación, así como el agua formada por la condensación del vapor, hasta alcanzar el nivel de presión y temperatura establecidos para la etapa de sostenimiento (Yáñez Angarita et al., 2010).
3. **Sostenimiento:** en este punto es donde realmente se logran los objetivos principales de la esterilización, dadas las condiciones de presión y temperatura del vapor de agua (Martínez Valencia, 2009).
4. **Descarga de vapor:** una vez finalizado el tiempo de sostenimiento, se inicia la descarga del vapor y de los condensados presentes en el interior de las autoclaves, con el objetivo de evacuar el fruto esterilizado para su posterior procesamiento (Wambeck, 1999).

2.3.3 Aspectos técnicos

Es necesario conocer y manejar ciertos aspectos técnicos, los cuales indican si se está ejecutando el proceso de esterilización de la manera más adecuada.

Estos aspectos técnicos son:

- **Capacidad de esterilización (Ce):** es la cantidad de RFF que pueden ser esterilizados por hora (Yáñez Angarita et al., 2010). Se expresa como:

$$Ce = \frac{A * CA * 60}{Tte} \quad (1)$$

Donde:

A: número de autoclaves en operación.

CA: capacidad de RFF por autoclave.

Tte: tiempo total de esterilización, incluyendo manipulación de los RFF.

- **Factor de esterilización (Fe):** es una medida de la oferta de fruto esterilizado y el requerido para el prensado. Un factor por debajo de 1 se traduce como una operación intermitente de las prensas por falta de fruto esterilizado. (Yáñez Angarita et al., 2010).

Se expresa como:

$$Fe = \frac{Ce}{Cp} \quad (2)$$

Donde:

Ce: capacidad de esterilización.

Cp: capacidad de prensado.

- **Pérdida de capacidad de esterilización (Pce):** indica la disminución en la oferta de fruto cocido (Yáñez Angarita et al., 2010). Se expresa como:

$$\%Pce = \left(\frac{Ce \text{ real} - Ce \text{ teórica}}{Ce \text{ teórica}} \right) * 100 \quad (3)$$

Donde:

Ce real: capacidad de esterilización real.

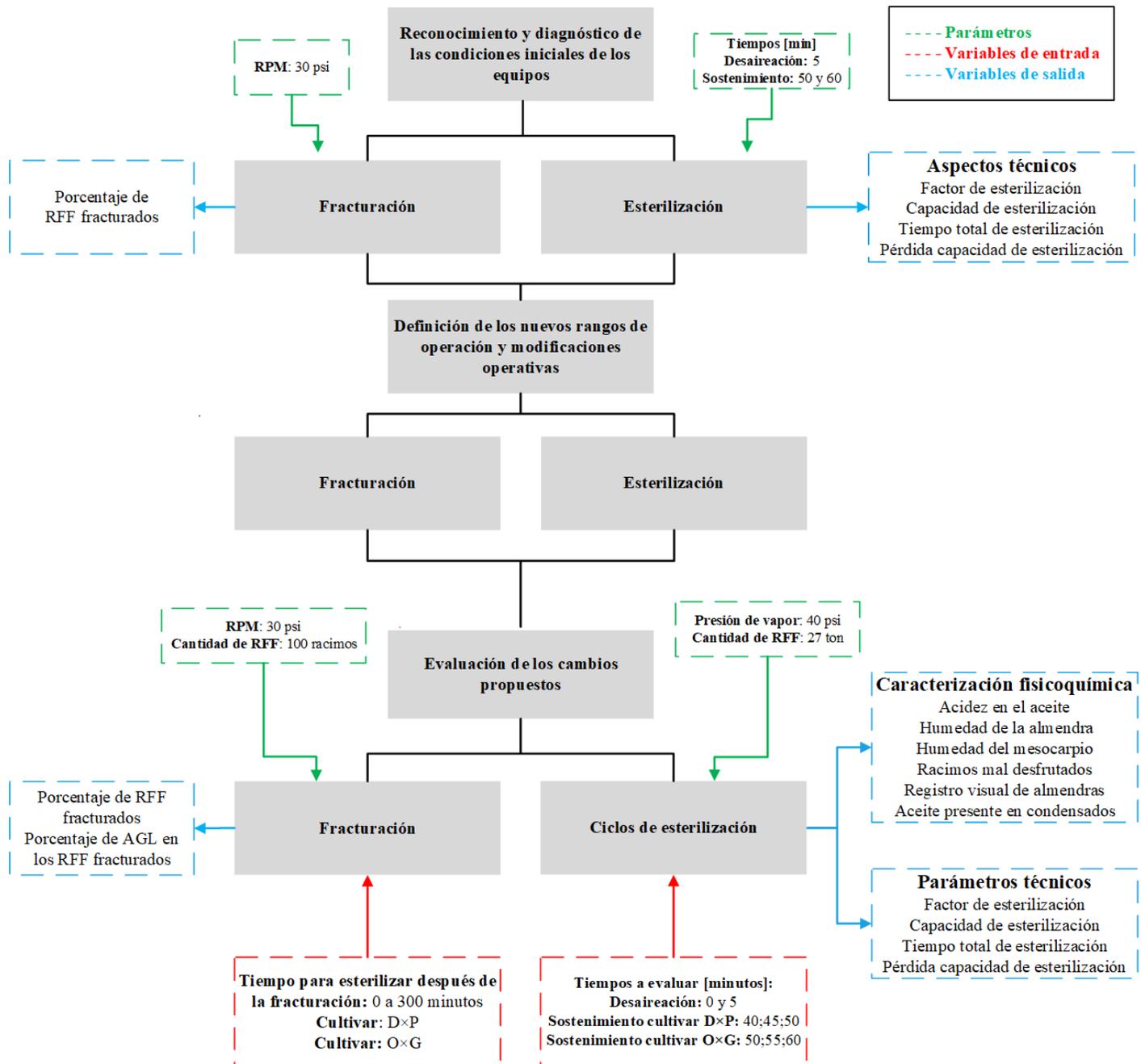
Ce teórica: capacidad de esterilización nominal.

3. Metodología

La metodología aplicada en el proyecto se dividió en las 3 etapas descritas en la **Figura 3**.

Figura 3.

Cuadro metodológico del proyecto



3.1 Reconocimiento y diagnóstico del estado inicial de los equipos

Se llevó a cabo una revisión de los diagramas de proceso correspondientes a la etapa de fracturación y esterilización de los RFF. Esta revisión se complementó con una inspección visual y funcional del fracturador, las autoclaves y el sistema general de esterilización, identificando así su funcionamiento y las posibles modificaciones en los equipos.

En la etapa de fracturación es importante conocer el porcentaje de RFF fracturados como una medida de la eficiencia de este equipo, el cual se determina por medio de la siguiente expresión:

$$\%RFF \text{ fracturados} = \left(\frac{RFF \text{ fracturados}}{RFF \text{ evaluados}(100)} \right) * 100 \quad (4)$$

De igual manera, se determinaron las revoluciones por minuto (RPM) del equipo. En cuanto al sistema de esterilización, se determinaron factores técnicos tales como: tiempo total de los ciclos de esterilización, capacidad de esterilización, factor de esterilización y pérdida de la capacidad de esterilización. Todos estos datos se recopilaron con el propósito de comprender y definir las condiciones iniciales de operación de los sistemas.

3.2 Definición de los nuevos rangos de operación y modificaciones operativas

En el sistema de fracturación, se realizaron cambios operativos con el objetivo de aumentar la cantidad de RFF fracturados, tales como: cambio de cuchillas, modificación de las barras de retención y el posible aumento de RPM.

En el sistema de esterilización, se evaluó el efecto de la desaireación y de los tiempos de sostenimiento, con el fin de determinar los ciclos de esterilización para los cultivares D×P y O×G que garanticen la operación más eficiente del proceso.

En el caso de la etapa de desaireación se evaluaron dos tiempos (0 y 5 minutos), determinando si su aplicación es necesaria en los ciclos de esterilización.

Con respecto a los tiempos de sostenimiento, se evaluaron ciclos de esterilización para el cultivar D×P con los siguientes tiempos: 50, 45 y 40 minutos. Para el cultivar O×G, se evaluaron los siguientes tiempos: 60, 55 y 50 minutos.

Estos rangos establecidos para la evaluación de cada ciclo de esterilización comprenden el tiempo de sostenimiento operado por la planta en el año 2021 (50 y 60 minutos con desaireación) hasta el tiempo mínimo recomendado por el fabricante (40 y 50 minutos sin desaireación).

3.3 Evaluación de los cambios propuestos

Para los ensayos realizados, se seleccionaron RFF maduros según los criterios de clasificación establecidos por Prada Chaparro & Romero Angulo, 2012. De este modo, se minimizan las posibles variaciones en los resultados por el grado de maduración.

En la etapa de fracturación, se determinó el porcentaje de RFF fracturados después de los ajustes realizados en este equipo, y la concentración de AGL presentes en el aceite de palma extraído de 8 grupos de RFF con diferentes intervalos de tiempo, entre 0 y 300 minutos, desde su fracturación hasta el momento de la esterilización de cada grupo.

Con respecto al sistema de esterilización, se analizaron 6 variables en los frutos esterilizados de cada ciclo evaluado, las cuales se describen a continuación:

Humedad del mesocarpio: esta variable se determinó según la norma NTC-287, 2002. El procedimiento se encuentra detallado en el **Apéndice B**.

Humedad de la almendra: esta variable se determinó según la norma NTC-287, 2002. El procedimiento se encuentra detallado en el **Apéndice C**.

Acidez en el aceite extraído: esta variable se determinó según la norma NTC-218, 2011.

El procedimiento se encuentra detallado en el **Apéndice D**.

Aceite presente en condensados: esta variable se determinó según la metodología establecida por Cala A. et al., 2011. El procedimiento se encuentra detallado en el **Apéndice E**.

Racimos mal desfrutados: esta variable se determinó según la metodología establecida por Cala A. et al., 2011, la cual se expresa como una relación porcentual con respecto a una muestra de 100 tusas a la salida de la etapa de desfrutado. Se calcula como:

$$\% \text{Racimos mal desfrutados} = \left(\frac{\text{Racimos mal desfrutados}}{\text{Racimos evaluados}(100)} \right) * 100 \quad (5)$$

Registro visual de la coloración de las almendras: Se registró visualmente la coloración de las almendras evaluando cómo los tiempos de sostenimiento influían en el color de estas.

El análisis estadístico de estas variables se encuentra detallado en el **Apéndice F**.

Del mismo modo, se calcularon los siguientes aspectos técnicos para cada ciclo de esterilización evaluado, determinando qué ciclos presentaron una mejor eficiencia para el sistema de esterilización.

- Tiempo total de esterilización
- Capacidad de esterilización
- Factor de esterilización
- Pérdida de capacidad de esterilización

4. Resultados y análisis

4.1 Reconocimiento y diagnóstico del sistema de fracturación y esterilización

4.1.1 *Fracturador de RFF*

PPW dispone de un fracturador que constituye la primera etapa del procesamiento de los RFF. Cuando la empresa adquirió este equipo en el año 2020, el objetivo era fracturar el 100% de los RFF antes de ingresarlos a las autoclaves para su respectivo ciclo de esterilización. Este fracturador, tiene una capacidad de 45 t RFF/h, opera a 26 RPM y está equipado con un eje que alberga 6 cuchillas de acero dispuestas en serie, diseñadas para dividir los RFF en un máximo de 4 partes (ver **Figura 4**).

Figura 4.

Fracturador de RFF de la empresa PPW



Durante el diagnóstico, se determinó mediante la **ecuación 4** un porcentaje de RFF fracturados de 78.7%, lo que significa que un 21.3% de RFF que pasa por este equipo no están siendo fracturados. Esto se asocia principalmente a la variedad de tamaños de los cultivares y a las condiciones de operación del equipo.

4.1.2 Sistema de esterilización inclinada

La empresa PPW cuenta con un sistema de esterilización inclinada semiautomatizado, compuesto por 3 autoclaves con una capacidad nominal de 15 t RFF/h cada una, lo que ofrece una capacidad nominal total de 45 t RFF/h.

Este sistema se caracteriza por la optimización y automatización del proceso de esterilización. El ingreso de los RFF se realiza mediante un transportador de arrastre por cadenas (redlers), el cual lleva directamente el fruto desde la tolva de recepción hasta la compuerta de entrada de las autoclaves. Este sistema se diferencia del sistema de esterilización convencional, el cual emplea vagonetas para introducir los RFF en el interior de las autoclaves, dando lugar a tiempos muertos debido a su manipulación, lo que dificulta la continuidad del proceso. Finalmente, la descarga de los racimos esterilizados se realiza de manera sencilla y eficiente, gracias al ángulo de inclinación de las autoclaves que permite la evacuación de los racimos por efecto de la gravedad (ver **Figura 5**).

Figura 5.

Sistema de esterilización inclinada de la empresa PPW



En un estudio realizado por Mulligan, 2010, destaca que el sistema de esterilización inclinada reduce la mano de obra, el consumo energético y aumenta la seguridad del personal.

Además, este mismo autor afirma que es relativamente pequeña la cantidad de repuestos requeridos por el sistema, lo que reduce costos y tiempos de mantenimiento.

Con el objetivo de realizar un diagnóstico operativo de las condiciones iniciales del sistema de esterilización inclinada, se determinaron los tiempos promedio empleados de las etapas que conforman un ciclo de esterilización durante el año 2021 (ver **Tabla 1**).

Tabla 1.

Tiempos empleados en los ciclos de esterilización en la empresa PPW durante el año 2021

Etapas del ciclo de esterilización	Tiempo [min]
Llenado de la autoclave	19.4
Limpieza de la compuerta superior	3.0
Desaireación	5.0
Ascenso a sostenimiento	17.0
Sostenimiento	50 (D×P) - 60 (O×G)
Descarga de vapor	17.5
Descarga de fruto	4.0
Limpieza de la compuerta inferior	4.0
Tiempo total	119.9 – 129.9

Del mismo modo, se determinaron los siguientes aspectos técnicos: tiempo total de esterilización (T_{te}), capacidad de esterilización (C_e), factor de esterilización (F_e) y pérdida de capacidad de esterilización (P_{ce}).

En la **Tabla 2**, se observa que los tiempos empleados para completar un ciclo de esterilización en el año 2021, son de 119.9 y 129.9 minutos, lo que se traduce en una capacidad de esterilización de 40.5 y 37.4 t RFF/h para el cultivar D×P y O×G, respectivamente. En la guía de esterilización para RFF realizada por Yáñez Angarita et al., 2010, se menciona que el tiempo total empleado para un ciclo, puede variar según el estado físico (enteros o fracturados), el grado madurez y el tipo de cultivar de los RFF. Sin embargo, el tiempo total sugerido por este autor está

en un rango de 90 a 100 minutos. Teniendo en cuenta esta recomendación, se observa que los ciclos de esterilización empleados en la empresa PPW en el año 2021, superan el tiempo máximo recomendado.

Considerando que la empresa PPW dispone de un sistema de prensado con una capacidad de 45 t RFF/h, los factores de esterilización determinados para ambos cultivares se encuentran por debajo de 1. Esto significa una baja disponibilidad de frutos esterilizados, dando lugar a una pérdida de capacidad de esterilización del 9.94% y 16.9% para los cultivares D×P y O×G, respectivamente (ver **Tabla 2**).

Tabla 2.

Parámetros técnicos de los ciclos de esterilización empleados en la empresa PPW durante el año 2021

Cultivar	Ciclo de esterilización	Tte [min]	Ce [t RFF/h]	Fe	Pce [%]
D×P	Presión: 40 psi Desaireación: 5 minutos Sostenimiento: 50 minutos	119.9	40.5	0.9	9.94
O×G	Presión: 40 psi Desaireación: 5 minutos Sostenimiento: 60 minutos	129.9	37.4	0.8	16.9

Dado que los aspectos técnicos determinados para las condiciones iniciales del sistema de esterilización se traducen en una menor capacidad de esterilización para ambos cultivares y en una operación intermitente en las prensas, surge la necesidad de evaluar ciclos de esterilización con tiempos de desaireación y sostenimiento más cortos, los cuales garanticen una operación continua y un fruto esterilizado adecuado para sus etapas posteriores de procesamiento.

4.2 Evaluación de los cambios propuestos

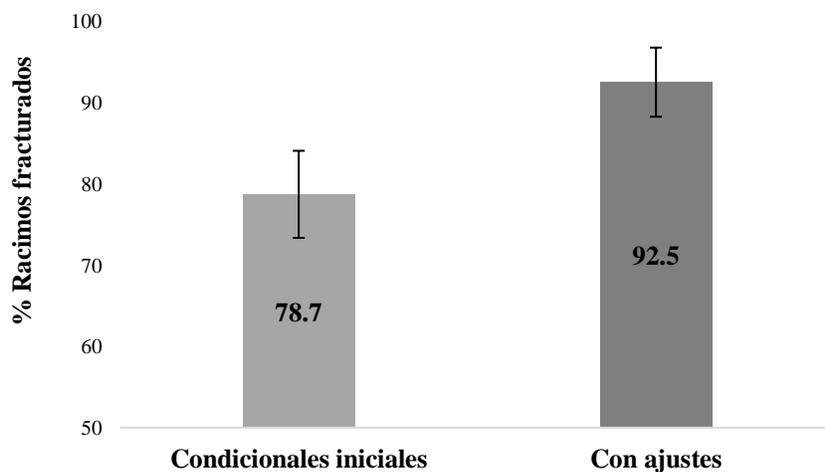
4.2.1 *Fracturador de RFF*

4.2.1.1 Porcentaje de RFF fracturados

Una vez identificado el porcentaje de RFF fracturados bajo las condiciones iniciales del equipo, se realizó el cambio de las cuchillas desgastadas y la modificación de las barras de retención ubicadas en la parte inferior del eje principal. Estas modificaciones permitieron aumentar la cantidad de los RFF fracturados de 78.7% a 92.5%, lo que se traduce en un aumento del 13.8% con respecto a la fracturación inicial (ver **Figura 6**).

Figura 6.

Cantidad de RFF fracturados antes y después de los ajustes realizados en el fracturador



De acuerdo con el estudio realizado por Pelaéz, 2010, la fracturación de los RFF conlleva ventajas significativas, como la reducción del consumo de vapor y del tiempo necesario para lograr una esterilización eficiente, así como la disminución del fruto adherido en las tusas. Estas ventajas destacan la importancia del aumento de la cantidad de RFF fracturados que se obtuvo por las modificaciones realizadas en el equipo.

Este porcentaje de fracturación se puede garantizar siempre y cuando se realice un plan de mantenimiento preventivo del equipo, con el fin de evitar el desgaste de las cuchillas y el desajuste de las barras de retención, lo que podría dar lugar a problemas operativos como obstrucciones y la reducción del rendimiento del equipo, afectando el procesamiento en general.

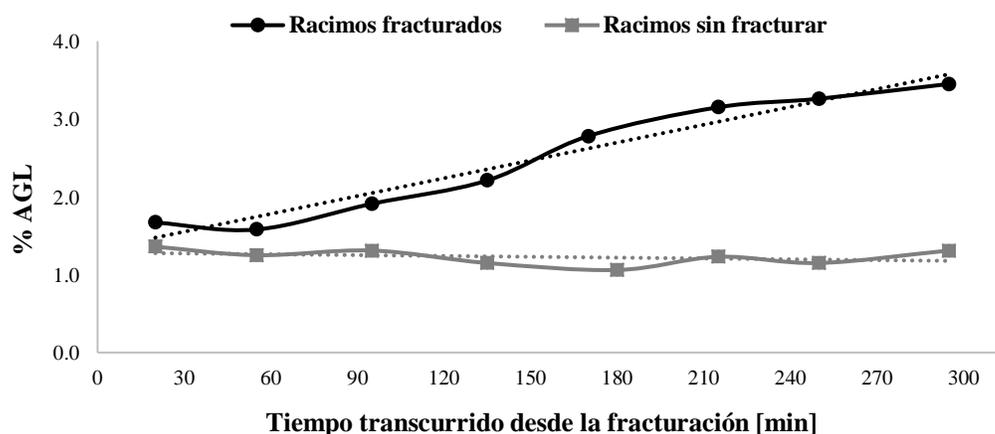
4.2.1.2 Concentración de AGL en el aceite extraído de los RFF fracturados

Una vez establecidas las nuevas condiciones de operación del fracturador, se determinó el efecto de la fracturación de los RFF en la concentración de AGL presentes en el APC.

En los ensayos realizados para el cultivar D×P, se observó un incremento en la concentración de AGL con respecto al tiempo transcurrido entre la fracturación y la esterilización de los RFF, alcanzando una concentración de AGL en el aceite extraído de 3.45% para el tiempo de 295 minutos. En contraste, la concentración en los RFF sin fracturar tuvo un comportamiento estable en el rango de tiempo analizado, con un promedio de 1.23% AGL (ver **Figura 7**). Esto se debe principalmente a que el proceso de acidificación se acelera considerablemente cuando los RFF son golpeados o maltratados antes de su esterilización (Montoya P. et al., 2013).

Figura 7.

Concentración de los AGL en el aceite de los RFF fracturados y sin fracturar del cultivar D×P

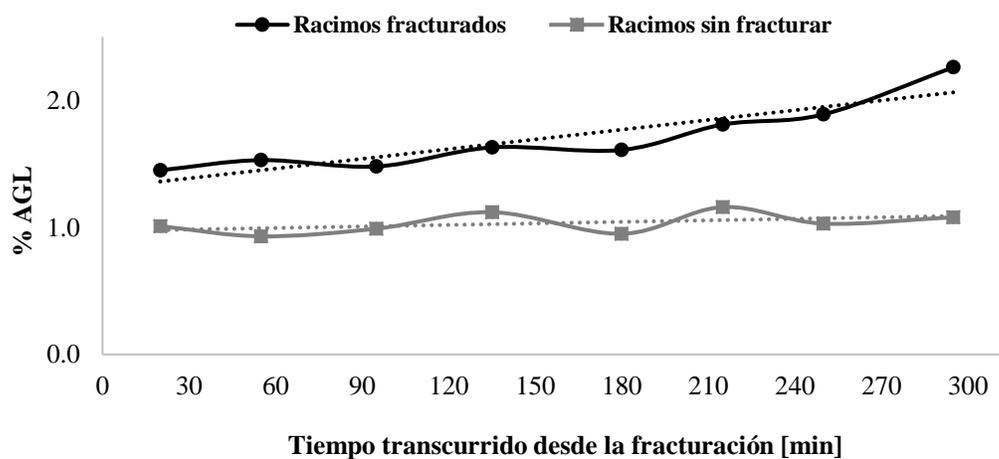


Estos resultados resaltan la importancia de esterilizar los RFF del cultivar D×P, en un plazo máximo recomendado de 120 minutos después de la etapa de fracturación, evitando así un aumento significativo en la concentración de AGL, lo que puede afectar la calidad y el valor comercial del APC por el alto nivel de degradación (Ngue Benoit Constant et al., 2020).

En los ensayos realizados para el cultivar O×G, se observó que la concentración de AGL de los RFF fracturados tuvo un promedio de 1.71%, mientras que los RFF sin fracturar tuvieron un promedio de 1.03%. El comportamiento de los AGL para las dos condiciones evaluadas de los RFF, no evidencian aumentos significativos hasta un rango de evaluación de 200 minutos, lo cual sugiere que a diferencia del cultivar D×P, no es necesario realizar una esterilización inmediata para este cultivar (**Figura 8**).

Figura 8.

Concentración de los AGL en el aceite de los RFF fracturados y sin fracturar del cultivar O×G



La poca variación en la concentración de los AGL para los RFF de cultivar O×G se debe principalmente a que la actividad funcional de la lipasa es menor en comparación a la del cultivar D×P (Cadena et al., 2013). Es importante destacar que la norma técnica colombiana NTC-218, 2011, establece un rango permitido para la concentración de AGL en el APC de 2.5 a 3.0%.

4.2.2 Sistema de esterilización inclinada

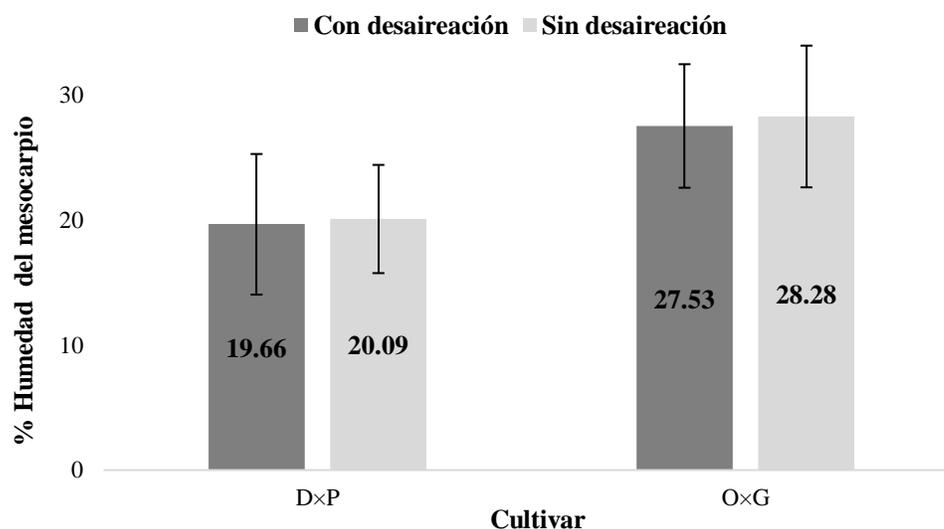
4.2.2.1 Humedad del mesocarpio

La humedad del mesocarpio esterilizado se analiza con el fin de determinar su disminución debido a la evaporación del agua durante la esterilización. La presencia de humedad en el mesocarpio puede dificultar la liberación del aceite durante la etapa de prensado y afectar el rendimiento general de la extracción, específicamente en la etapa de clarificación (Martínez Valencia, 2009).

En la **Figura 9** se observan los porcentajes de humedad en los mesocarpios esterilizados, siendo del 19.66% y 20.09% para el cultivar D×P, y del 27.53% y 28.28% para el cultivar O×G. Estos resultados no presentan diferencias significativas por la influencia de la aplicación de la desaireación, lo que puede atribuirse principalmente al diseño de las autoclaves del sistema de esterilización inclinada. Este diseño evita la formación de “bolsas de aire” reduciendo los espacios vacíos ya que las autoclaves son llenadas en su totalidad por los RFF. Por lo tanto, la aplicación de la desaireación se vuelve innecesaria.

Figura 9.

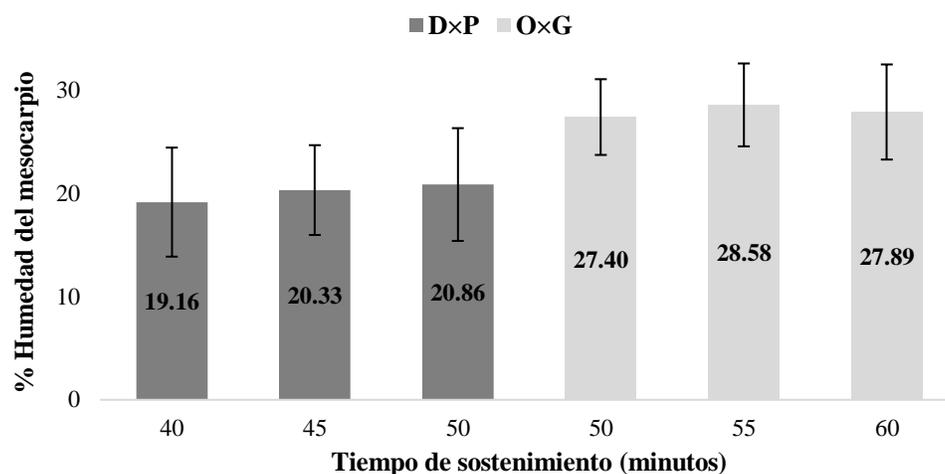
Humedad presente en los mesocarpios esterilizados por efecto de la desaireación



Del mismo modo, en la **Figura 10** se observa que la humedad presente en los mesocarpios esterilizados para ambos cultivares, no presenta diferencias significativas por los diferentes tiempos de sostenimiento evaluados. De acuerdo con estos resultados, se observa que el proceso de evaporación del agua contenida en el mesocarpio alcanza un equilibrio después de un tiempo determinado, en este caso, se da a partir de los 40 minutos para el cultivar D×P y a los 50 minutos para el cultivar O×G.

Figura 10.

Humedad presente en los mesocarpios esterilizados por efecto de los tiempos de sostenimiento



En un estudio realizado por Caballero Blanco et al., 2022, se determinó la humedad en los mesocarpios esterilizados del cultivar D×P, en el cual reportan un valor promedio de 25% para un total de 60 pruebas realizadas en plantas de beneficio de las zonas oriental y suroccidental. Con base en los resultados presentados en la **Figura 10**, se observa que la humedad de los mesocarpios en los ciclos de esterilización evaluados se encuentran aproximadamente un 5% por debajo de los valores reportados por este autor. Esto sugiere que la tasa de evaporación en el mesocarpio no difiere significativamente de la reportada en otras plantas de extracción con sus sistemas de esterilización respectivos.

Sin embargo, experimentos a escala comercial y de laboratorio, han demostrado que la recuperación de aceite mejora de acuerdo con el contenido de humedad del mesocarpio después de la esterilización. Se ha encontrado que este contenido óptimo de humedad debe ser aproximadamente de 10 a 12%, y si pasa de 12%, la tasa de recuperación de aceite disminuye en las etapas posteriores (Wambeck, 2007).

Teniendo en cuenta que no se encontraron diferencias significativas en la humedad de los mesocarpios bajo la influencia de la desaireación y los tiempos de sostenimiento para ambos cultivares analizados, se deben explorar nuevas alternativas de operación que permitan reducir el contenido de humedad durante la esterilización en la empresa PPW.

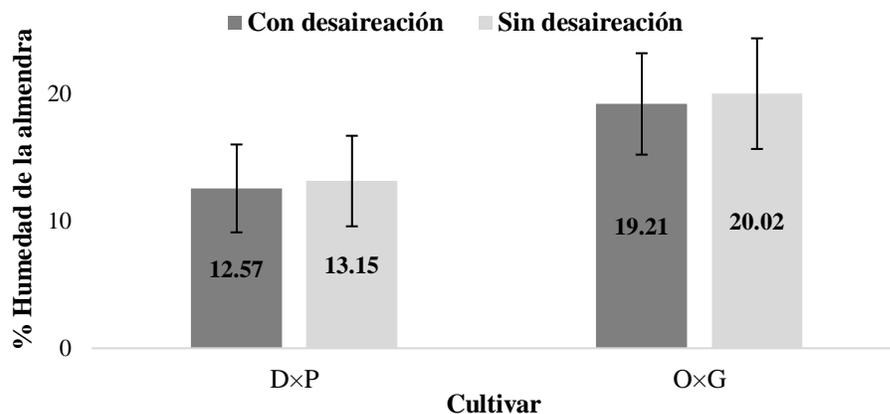
4.2.2.2 Humedad de la almendra

La humedad de la almendra se analiza debido a que es un indicador de su deshidratación. La esterilización provoca un desecamiento el cual conlleva a una reducción del tamaño de la almendra, lo que permite que se desprenda de la cáscara que la envuelve, facilitando así su separación y lograr mayor eficiencia durante el proceso de extracción del aceite de palmiste (Martínez et al., 2011).

En la **Figura 11** se observan los porcentajes de humedad presentes en las almendras esterilizadas, siendo del 12.57% y 13.15% para el cultivar D×P, y del 19.21% y 20.02% para el cultivar O×G. Estos resultados no presentan diferencias significativas por la influencia de la aplicación de la desaireación.

Figura 11.

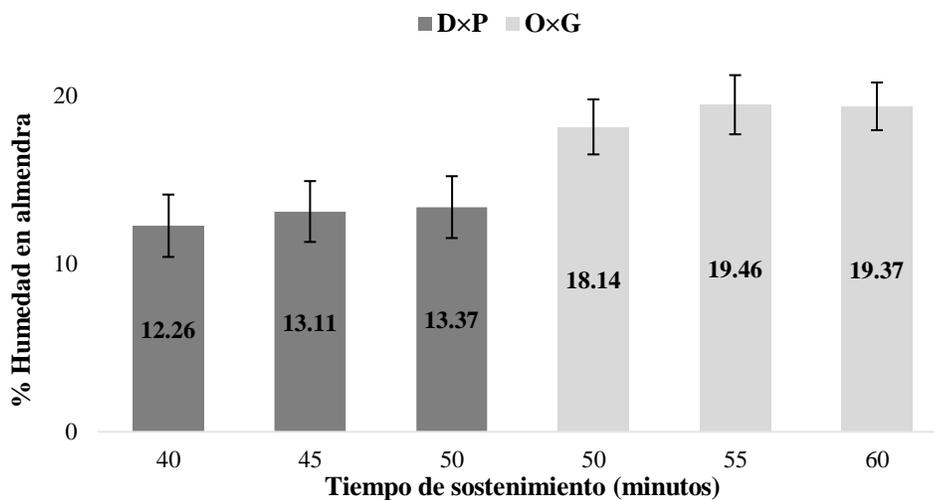
Humedad presente en las almendras esterilizadas por efecto de la desaireación



De igual manera, en la **Figura 12** se observan los porcentajes de humedad presentes en las almendras esterilizadas, siendo del 12.26%, 13.11% y 13.37% para el cultivar DxP, y del 18.14%, 19.46% y 19.37% para el cultivar O×G. Estos resultados no presentan diferencias significativas en la humedad de las almendras esterilizadas por la influencia de los diferentes tiempos de sostenimiento evaluados.

Figura 12.

Humedad presente en las almendras esterilizadas por efecto de los tiempos de sostenimiento



Según Menon, 2013, las nueces con un contenido de humedad alrededor del 15% y las almendras con un contenido inferior al 20%, pueden ser partidas con una eficiencia de rotura hasta del 98% en la etapa de recuperación de almendra para el proceso de extracción de AP y TP. Con base a los resultados mostrados en la **Figura 12**, se observa que los tiempos de sostenimiento evaluados para ambos cultivares, garantizan que los porcentajes de humedad en las almendras sean inferiores al 20%, lo cual incrementa la recuperación de la almendra como lo afirma Menon, 2013.

Del mismo modo, en una investigación realizada por Martínez Valencia, 2009, se evaluaron ciclos de esterilización a una presión de 30 psi y 40 minutos de sostenimiento, dando como resultado un valor de 15.95% de humedad en la almendra, afirmando que en estas condiciones se presenta un desprendimiento óptimo del cuesco y un buen color por la cocción.

Estos dos autores rectifican la importancia de los resultados obtenidos de la humedad de las almendras esterilizadas, garantizando la eficiencia de los ciclos de esterilización evaluados en esta investigación.

4.2.2.3 Acidez del aceite

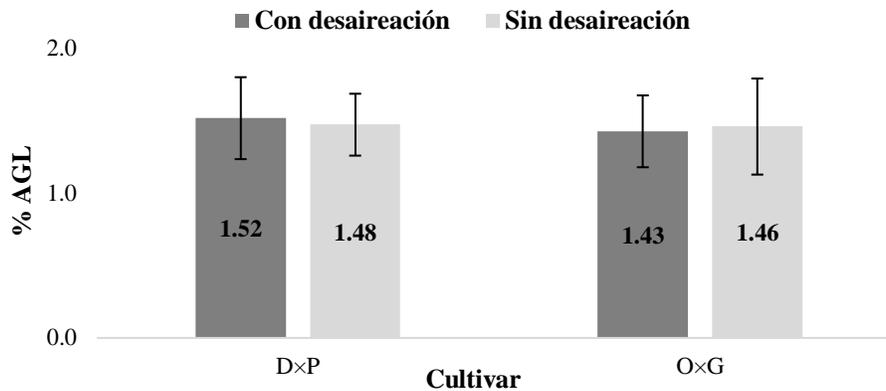
En la extracción de aceite de palma, la concentración de AGL es una de las variables más importantes a analizar, ya que una alta concentración puede afectar el sabor y la estabilidad del aceite. Por lo tanto, es crucial controlar este parámetro en el proceso de extracción (Wambeck, 1999). Según la norma técnica colombiana NTC-218, 2011, el rango permitido para la concentración de AGL en el aceite de palma crudo almacenado es de 2.5 a 3.0%.

En la **Figura 13** se observan los porcentajes de concentración de AGL en el aceite extraído de los racimos esterilizados, siendo del 1.52% y 1.48% para el cultivar D×P, y del 1.43% y 1.46%

para el cultivar O×G. Estos resultados no presentan diferencias significativas en la concentración de AGL por la influencia de la aplicación de la desaireación.

Figura 13.

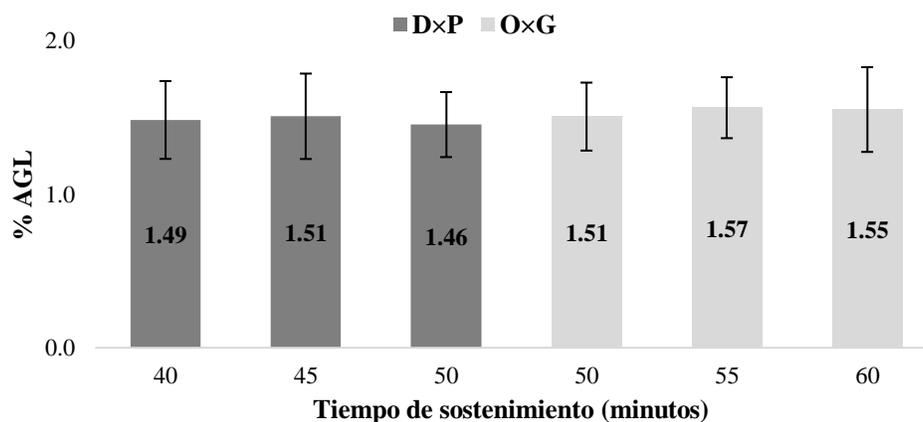
Concentración de AGL del aceite de licor de prensa por efecto de la desaireación



De igual manera, en la **Figura 14** se observan los porcentajes de concentración de AGL en el aceite extraído, siendo del 1.49%, 1.51% y 1.46% para el para el cultivar D×P, y del 1.51%, 1.57% y 1.55% para el cultivar O×G. Estos resultados no presentan diferencias significativas por la influencia de los diferentes tiempos de sostenimiento evaluados.

Figura 14.

Concentración de AGL del aceite de licor de prensa por efecto de los tiempos de sostenimiento



La formación de AGL se puede detener a una temperatura de 65 °C, pero se requieren temperaturas más elevadas para garantizar el acondicionamiento de los RFF y reducir el tiempo de esterilización (Thang et al., 2021). Dado que los ciclos de esterilización evaluados en esta investigación se realizaron a una presión de 40 psi, la temperatura del vapor saturado a esta presión es de aproximadamente 130.7 °C (Turchetti, 2006). Por lo tanto, la formación de AGL se puede evitar siempre y cuando se garanticen estas condiciones de presión y temperatura, descartando el aumento de AGL en el aceite extraído por la influencia de los tiempos de desaireación y sostenimiento.

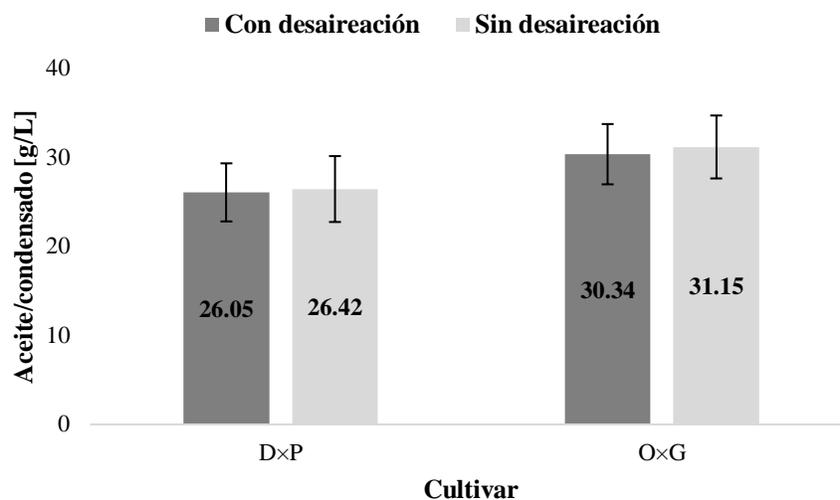
4.2.2.4 Aceite presente en condensados

Los efluentes generados en la extracción de aceite de palma no contienen sustancias tóxicas, sin embargo, se caracterizan por tener altas temperaturas y una alta demanda bioquímica de oxígeno (DBO>25.000 ppm), lo que representa un impacto negativo ambiental para los ecosistemas donde son vertidos (Chaparro Triana et al., 2023). Teniendo en cuenta que gran parte de estos efluentes generados durante el proceso de extracción son provenientes del proceso de esterilización, es necesario reducir la formación de estos evaluando tiempos de sostenimiento más cortos.

En la **Figura 15** se observan las cantidades de aceite presente en condensados, siendo del 26.05 y 26.42 [g/L] para el cultivar D×P, y de 30.34 y 31.15 [g/L] para el cultivar O×G. Estos resultados no presentan diferencias significativas por la influencia de la aplicación de la desaireación.

Figura 15.

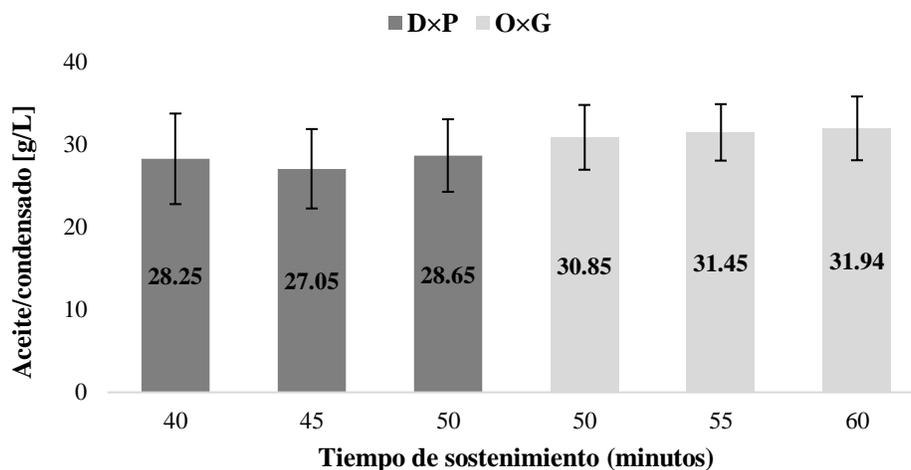
Cantidad de aceite presente en condensados por efecto de la desaireación



De igual manera, en la **Figura 16** se observan las cantidades de aceite presente en condensados, siendo del 28.25, 27.05 y 28.65 [g/L] para el cultivar DxP, y del 30.85, 31.45 y 31.94 [g/L] para el cultivar O×G. Estos resultados no presentan diferencias significativas por la influencia de los diferentes tiempos de sostenimiento evaluados.

Figura 16.

Cantidad de aceite presente en condensados por efecto de los tiempos de sostenimiento



Si bien los resultados no presentan diferencias significativas en la cantidad de aceite presente en los condensados bajo la influencia de los diferentes tiempos de desaireación y sostenimiento, la elección de los ciclos de esterilización donde no se realiza desaireación y los tiempos de sostenimiento son los más cortos (40 minutos para cultivar D×P y 50 minutos para cultivar O×G), conlleva a una menor generación de la cantidad total de condensados provenientes del sistema de esterilización. Esto se traduce en una menor pérdida de aceite total por los condensados generados y, al mismo tiempo, beneficia el sistema de tratamiento de aguas residuales al reducir la cantidad de efluentes que requieren tratamiento.

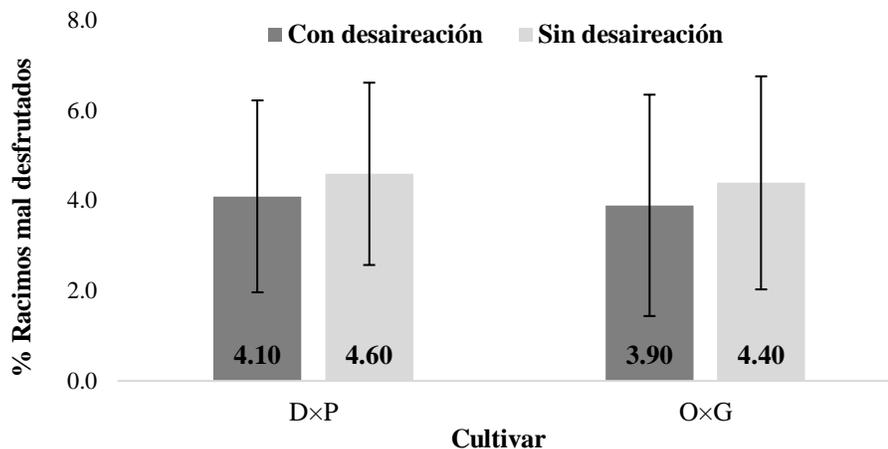
4.2.2.5 Racimos mal desfrutados

La desfrutación de los racimos ocurre por la evaporación del agua presente en los tejidos de la unión entre el fruto y la tusa, lo que resulta en el ablandamiento de esta (Cala Gaitán & Bernal Castillo, 2008). En la etapa de desfrutación, se considera que un racimo está mal desfrutado cuando contiene frutos adheridos que se pueden remover fácilmente, lo cual se asocia a las condiciones de los ciclos de esterilización o al grado de maduración de los RFF (Wambeck, 1999).

En la **Figura 17** se observan los porcentajes de racimos mal desfrutados, siendo del 4.10% y 4.60% para el cultivar D×P, y del 3.90% y 4.40% para el cultivar O×G. Estos resultados no presentan diferencias significativas por la influencia de la aplicación de la desaireación, rectificando que su uso es innecesario en los ciclos de esterilización.

Figura 17.

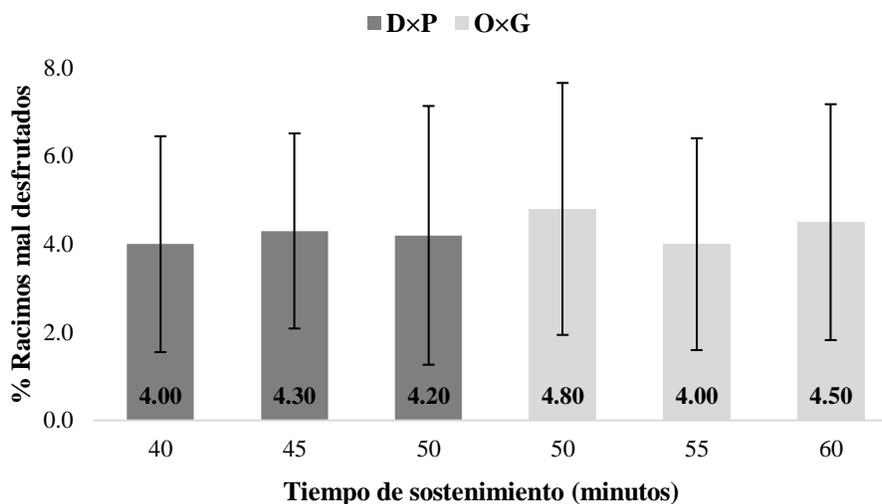
Porcentaje de racimos mal desfrutados por efecto de la desaireación



De igual manera, en la **Figura 18** se observan los porcentajes de racimos mal desfrutados, siendo del 4.0%, 4.30% y 4.20% para el cultivar D×P, y del 4.80%, 4.0% y 4.5% para el cultivar O×G. Estos resultados no presentan diferencias significativas por la influencia de los diferentes tiempos de sostenimiento evaluados.

Figura 18.

Porcentaje de racimos mal desfrutados por efecto del tiempo de sostenimiento



Si bien el tiempo de esterilización desempeña un papel crucial en la etapa de desfrutación de los racimos esterilizados, el grado de maduración del racimo (verde, maduro, sobremaduro) también influye significativamente en el análisis de esta variable. Dentro de los ensayos realizados, se observó que los racimos contabilizados como mal desfrutados, se clasificaban como racimos verdes según los criterios de calidad de Prada Chaparro & Romero Angulo, 2012. Por lo tanto, los resultados de los racimos mal desfrutados no se asocian directamente a una mala esterilización por la influencia de la desaireación o los tiempos de sostenimiento, sino a su grado de maduración.

En un análisis realizado por García Núñez et al., 2023, se determinó un valor de 7.53% de racimos mal desfrutados provenientes de un ciclo de esterilización con un tiempo de 5 minutos de desaireación y 40 minutos de sostenimiento para el cultivar D×P. Con base en este resultado, se observa que el porcentaje de racimos mal desfrutados de los ciclos de esterilización evaluados en este proyecto se encuentra por debajo del valor reportado por este autor.

Del mismo modo, según Bernal Castillo, 1988, si se emplean buenas condiciones de esterilización (presión y tiempo) y el estado de madurez de los RFF es óptimo, el porcentaje de racimos mal desfrutados debe ser inferior a 3%. Dado esto, se debe realizar un seguimiento diario del grado de maduración de los RFF que ingresan en la empresa PPW, con el objetivo de minimizar la presencia de racimos verdes y a su vez la cantidad de racimos mal desfrutados.

4.2.2.6 Registro visual

En el rango de los tiempos de sostenimiento evaluados, se observó una variación en el color de las almendras del cultivar D×P en relación con dichos tiempos (ver **Tabla 3**). Según Wambeck, 1999, el aspecto de las almendras (color oscuro) puede indicar tiempos extensos durante la esterilización de los RFF. Por lo tanto, los tiempos de sostenimiento de 50 y 60 minutos se pueden considerar excesivos, ya que presentaron cambios en el color de la almendra. Este autor refuerza

la necesidad de disminuir los tiempos de sostenimiento, evitando el impacto negativo en la calidad del aceite de palmiste por el sobrecalentamiento de las almendras (Yunda, 200 C.E.)

Tabla 3.

Registro visual de la coloración de las almendras esterilizadas del cultivar D×P

Sostenimiento [min]	40 minutos	50 minutos	60 minutos
Aspecto visual			

4.2.2.7 Aspectos técnicos de los ciclos evaluados

En la **Tabla 4** se observan los aspectos técnicos de los ciclos evaluados para el cultivar D×P, de los cuales el ciclo de esterilización sin desaireación y con un tiempo de sostenimiento de 40 minutos, presenta una capacidad de esterilización de 46.32 t RFF/h, la cual supera el valor de la capacidad nominal del sistema de esterilización (45 t RFF/h). La elección de este ciclo de esterilización representa un aumento del 14.3% en la capacidad de esterilización con respecto al ciclo empleado por la empresa en el año 2021, el cual comprendía un tiempo de desaireación de 5 minutos y un tiempo de sostenimiento de 50 minutos.

Tabla 4.

Aspectos técnicos de los ciclos de esterilización evaluados para el cultivar D×P

Ciclo de esterilización	Tte [min]	Ce [t RFF/h]	Fe	Pce [%]
Desaireación: 5 minutos Sostenimiento: 50 minutos	119,92	40,53	0,90	9,94
Desaireación: 0 minutos Sostenimiento: 50 minutos	114,92	42,29	0,94	6,02
Desaireación: 0 minutos Sostenimiento: 45 minutos	109,92	44,21	0,98	1,75
Desaireación: 0 minutos Sostenimiento: 40 minutos	104,92	46,32	1,03	-

De igual forma, en la **Tabla 5** se observan los aspectos técnicos de cada ciclo de esterilización evaluado para el cultivar O×G. Se observa que el ciclo de esterilización sin desaireación y con un tiempo de sostenimiento de 50 minutos, presenta una capacidad de esterilización de 42.29 t RFF/h. Si bien este valor se encuentra por debajo de la capacidad nominal del sistema de esterilización, este ciclo representa un aumento del 13.1% en la capacidad de esterilización con respecto al ciclo empleado por la empresa en el año 2021, el cual comprendía un tiempo de desaireación de 5 minutos y un tiempo de sostenimiento de 60 minutos.

Tabla 5.

Aspectos técnicos de los ciclos de esterilización evaluados para el cultivar O×G

Ciclo de esterilización	Tte [min]	Ce [t RFF/h]	Fe	Pce [%]
Desaireación: 5 minutos Sostenimiento: 60 minutos	129.92	37.41	0.83	16.87
Desaireación: 0 minutos Sostenimiento: 60 minutos	124.92	38.90	0.86	13.55
Desaireación: 0 minutos Sostenimiento: 55 minutos	119.92	40.53	0.90	9.94
Desaireación: 0 minutos Sostenimiento: 50 minutos	114.92	42.29	0.94	6.02

Teniendo en cuenta los aspectos técnicos determinados para ambos cultivares, la elección de los ciclos de esterilización sin desaireación y con los tiempos de sostenimiento de 40 y 50 minutos para los cultivares D×P y O×G, respectivamente, se traduce en un incremento en la eficiencia de la etapa de esterilización y del procesamiento general de los RFF. Es importante destacar que estos ciclos no presentaron diferencias significativas en cada una de las variables fisicoquímicas analizadas ni en la cantidad de racimos mal desfrutados, lo que garantiza que su aplicación no afectará el proceso de esterilización. Asimismo, esta elección da lugar a la posible disminución en la generación de condensados con contenido de aceite y un menor consumo de vapor al emplear tiempos de sostenimiento más cortos.

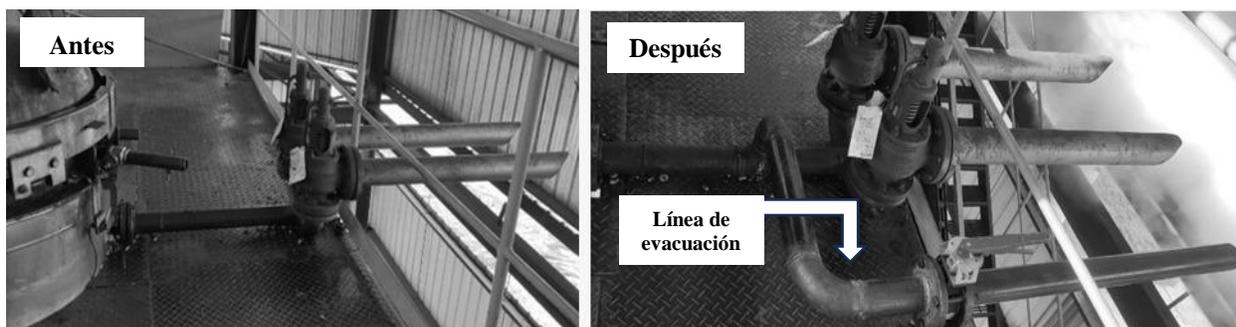
Adicionalmente, en la investigación realizada por Fuentes Perea, 2001, se determinaron los tiempos de sostenimiento más adecuados a una presión de 40 psi para los distintos grados de maduración de los RFF. En esta investigación se encontró que el tiempo de 40 minutos para los RFF maduros y sobremaduros; y el tiempo de 50 minutos para los RFF verdes, presentaban el mejor porcentaje de desfrutado y las menores pérdidas de aceite en tusas. Los resultados de esta investigación refuerzan la elección de los ciclos de esterilización anteriormente sugeridos en el presente proyecto.

4.2.2.8 Descarga de vapor

Los ciclos de esterilización empleados en el año 2021 por la empresa PPW, requerían de 17.5 minutos aproximadamente para la etapa de descarga de vapor, el cual se considera un tiempo muy extenso. Por lo tanto, con el fin de disminuir el tiempo de esta descarga y a su vez el tiempo total de los ciclos de esterilización, se implementó una nueva línea de evacuación de vapor en la parte superior de cada autoclave (ver **Figura 19**).

Figura 19.

Instalación de una nueva línea para la evacuación de vapor contenido en las autoclaves

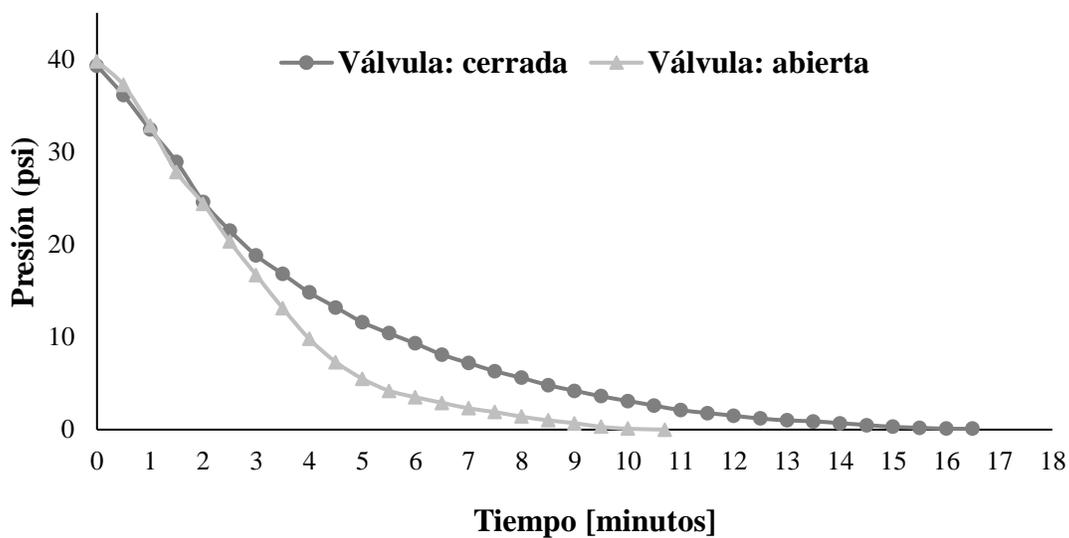


Tras la instalación de la nueva línea de evacuación, se llevó a cabo un seguimiento al del tiempo requerido para descargar el vapor bajo estas nuevas condiciones. En la **Figura 20** se observa que el tiempo total necesario para completar la descarga del vapor contenido en una

autoclave disminuyó de 17.5 a 10.7 minutos aproximadamente, lo que equivale a una reducción del 38.7% en el tiempo total empleado. Esta mejora se atribuye al hecho de que, inicialmente, la sección superior de las autoclaves no disponía de una línea de evacuación para el vapor contenido en esa área, lo cual dificultaba el proceso de descarga.

Figura 20.

Tiempo requerido para la descarga de vapor bajo la influencia de la nueva línea de evacuación.



4.2.2.9 Análisis financiero

Los ciclos de esterilización para los cultivares D×P y O×G en las condiciones iniciales (año 2021), tenían un tiempo total de 119.9 y 129.9 minutos, respectivamente, lo que corresponde a un promedio de 124.9 minutos, esto representaba una capacidad de esterilización de 38.9 t RFF/h. Teniendo en cuenta los ciclos de esterilización evaluados y propuestos en este proyecto, junto con la implementación de la nueva línea de descarga de vapor, se obtuvo un tiempo promedio total de 103.1 minutos, lo que equivale a una capacidad de 47.1 t RFF/h, dando como resultado un aumento de 8.24 t RFF/h.

Considerando que la empresa PPW opera 3 turnos de 8 horas cada día, reporta una tasa de extracción es del 21% y del 2.58% por tonelada de RFF para el APC y AP, respectivamente, y que los precios para el mes de julio del año 2022 estaban fijados en un valor de \$ 5,250,741.00 COP por tonelada de APC y \$ 4,590,578.00 COP por tonelada de AP (Fedepalma, 2022a), se calculó un estimado del ingreso económico adicional con respecto al aumento de capacidad en el sistema de esterilización obtenido por el desarrollo de este proyecto.

En la **Tabla 6** se observa que el ingreso económico estimado con relación al aumento de la capacidad de esterilización (8.24 t RFF/h) obtenido por el desarrollo de este proyecto es de \$ 241,475,221.53 COP por cada día de procesamiento.

Tabla 6.

Análisis financiero del aumento de capacidad de esterilización logrado en el presente proyecto

Aumento en la capacidad de esterilización [t RFF/h]	8.24
RFF procesados [t RFF/día]	197.76
Aceite de palma crudo extraído [t/día]	41.53
Aceite de palmiste extraído [t/día]	5.10
Ingreso económico por el aceite de palma crudo extraído [\$ COP/día]	218,063,273.73
Ingreso económico por el aceite de palmiste extraído [\$ COP/día]	23,421,947.80
Ingreso económico total estimado [\$ COP/día]	241,475,221.53

5. Conclusiones

El desarrollo de este proyecto permitió el aumento de la eficiencia en la etapa de esterilización mediante la implementación de modificaciones estructurales y operativas. Por medio de la evaluación y análisis realizados en el sistema de esterilización, se concluyó que los ciclos que presentaban los mejores resultados son aquellos que no emplean desaireación y los tiempos de sostenimiento son de 40 y 50 minutos para los cultivares D×P Y O×G, respectivamente. Adicionalmente, se disminuyó en un 38.7% el tiempo total empleado para la descarga de vapor debido a la implementación de las nuevas líneas de evacuación. La combinación de los ciclos de esterilización recomendados y de las nuevas líneas de evacuación de vapor, resultaron en un aumento del 22.21% y 20.16% de la capacidad de esterilización para cada cultivar. Esto representa un ingreso económico estimado de \$ 241,475,221.53 COP por cada día de procesamiento.

En el sistema de fracturación, las modificaciones realizadas incrementaron un 13.8% la cantidad de racimos fracturados, lo cual puede significar un aumento en la eficiencia de la esterilización, debido a que hay una mayor área expuesta de los RFF para la transferencia de calor durante la cocción y al mismo tiempo una posible disminución en el consumo de vapor.

Del mismo modo, los resultados encontrados sobre el comportamiento de los AGL en los RFF fracturados del cultivar O×G demuestran la estabilidad de este parámetro en el aceite extraído. En contraste, los resultados de este parámetro para los RFF del cultivar D×P, resaltan la necesidad de aplicar buenas prácticas para prevenir el aumento de la acidez en el aceite extraído, evitando así impactos negativos en su calidad y valor comercial.

6. Recomendaciones

Es fundamental asegurar que la recepción de los RFF en la tolva cumpla con los estándares de calidad y clasificación establecidos, ya que el proceso de esterilización y la extracción de aceite en general, no serán eficientes en su totalidad si los baches de RFF a esterilizar contienen una alta proporción de racimos verdes.

Es importante garantizar que los RFF del cultivar D×P sean esterilizados dentro de un lapso máximo de 120 minutos desde el momento de su fracturación. Esta práctica previene aumentos significativos en la concentración de ácidos grasos libres durante el proceso de extracción del APC. No obstante, no se plantea la misma necesidad con respecto a la fracturación de los RFF del cultivar O×G, ya que su contenido de AGL no aumenta significativamente por el impacto de la fracturación en su estructura.

La instalación de las nuevas líneas de evacuación de vapor en las autoclaves resultó en una significativa reducción del tiempo requerido para completar un ciclo de esterilización. Sin embargo, es esencial considerar un rediseño de estas líneas para prevenir accidentes laborales derivados del contacto entre el vapor y el personal operativo en la zona. La opción más recomendable es conectar estas líneas de evacuación a la chimenea de vapor del sistema de esterilización, la cual expulsa el vapor de manera segura hacia la atmósfera, cumpliendo así con los estándares de seguridad.

Se recomienda la implementación de metodologías alternas, las cuales permitan cuantificar la cantidad de vapor consumido y la cantidad de condensados generados en el sistema de esterilización, esto con el objetivo de comparar de manera más detallada los ciclos de esterilización evaluados y propuestos en este proyecto.

Bibliografía

- Alvarado Tobias, M. O. (2010). *Evaluación del proceso de clarificación en la planta de beneficio Palmagro S.A.* Universidad Nacional de Colombia.
- Bernal Castillo, G. (1988). Control de extractoras: métodos de análisis de laboratorio y control rápido de producción. *Palmas*.
- Caballero Blanco, K., Ospina Gallo, M., Cortés Barrero, Í. L., & García Núñez, J. A. (2022). *Medición del potencial industrial de aceite en racimos de fruta fresca utilizando la metodología masa que pasa al digestor (MPD)*. Corporación Centro de Investigación en Palma de Aceite, Cenipalma. <https://repositorio.fedepalma.org/handle/123456789/141464>
- Cadena, T., Prada, F., Perea, A., & Mauricio Romero, H. (2013). Lipase Activity, Mesocarp Oil Content, and Iodine Value in Oil Palm Fruits of *Elaeis Guineensis*, *Elaeis Oleifera*, and the Interspecific Hybrid O×G (*E. oleifera* x *E. guineensis*). *PALMAS*, 34(1), 16.
- Cala A., S. L., Yáñez A., E. E., & García N., J. A. (2011). *Manual de procedimientos de laboratorio en plantas de beneficio*. Corporación Centro de Investigación en Palma de Aceite - CENIPALMA.
- Cala Gaitán, G., & Bernal Castillo, G. (2008). *Procesos modernos de extracción de aceite de palma*. Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite (Fedepalma). <http://repositorio.fedepalma.org/handle/123456789/107713>
- Chaparro Triana, D. C., Ramírez Contreras, N. E., Munar Flórez, D. A., & García Núñez, J. A. (2023). *El rol de los efluentes de plantas de beneficio dentro de la circularidad de la agroindustria palmera y su aporte en la sostenibilidad*.

NTC-287, Grasas y aceites animales y vegetales. Determinación del contenido de humedad y materia volátil 11 (2002).

Fedepalma. (2022a). *Informe diario de precios y mercados*.

Fedepalma. (2022b). Principales cifras de la agroindustria de la palma de aceite en Colombia y en el mundo 2017-2021. *Anuario Estadístico*.

Forero Hernández, D. C., Hormaza Martínez, P. A., Moreno Caicedo, L. P., & Ruíz Romero, R. (2012). *Generalidades sobre la morfología y fenología de la palma de aceite* (p. 48).

Fuentes Perea, L. E. (2001). *Optimización y estandarización de las operaciones de esterilización, centrifugado y muestreo en el proceso de extracción de aceite de palma africana en la zona central*. UIS.

García Núñez, J. A., Cortés Barrero, Í. L., Barrera Hernández, J. C., Guerrero Sánchez, A. E., Caballero Blanco, K., Cala Amaya, S. L., Díaz Rangel, C. A., & Sierra González, S. M. (2023). Procesamiento del fruto de los cultivares híbridos interespecíficos O×G. In *Los híbridos interespecíficos O×G de palma de aceite* (I, pp. 465–502). Cenipalma.

Hamblin, K. (1991). Extracción de aceite de palma y nuevos criterios de procesamiento. *Palmas*, 12, 74–101.

NTC-218, Grasas y aceites vegetales y animales. Determinación del índice de acidez y de la acidez 16 (2011).

Martínez, L., Díaz, O. M., & García, J. A. (2011). Condiciones de esterilización para racimos de fruta de palma desgarrados. *Palmas*, 32(3), 65–73.

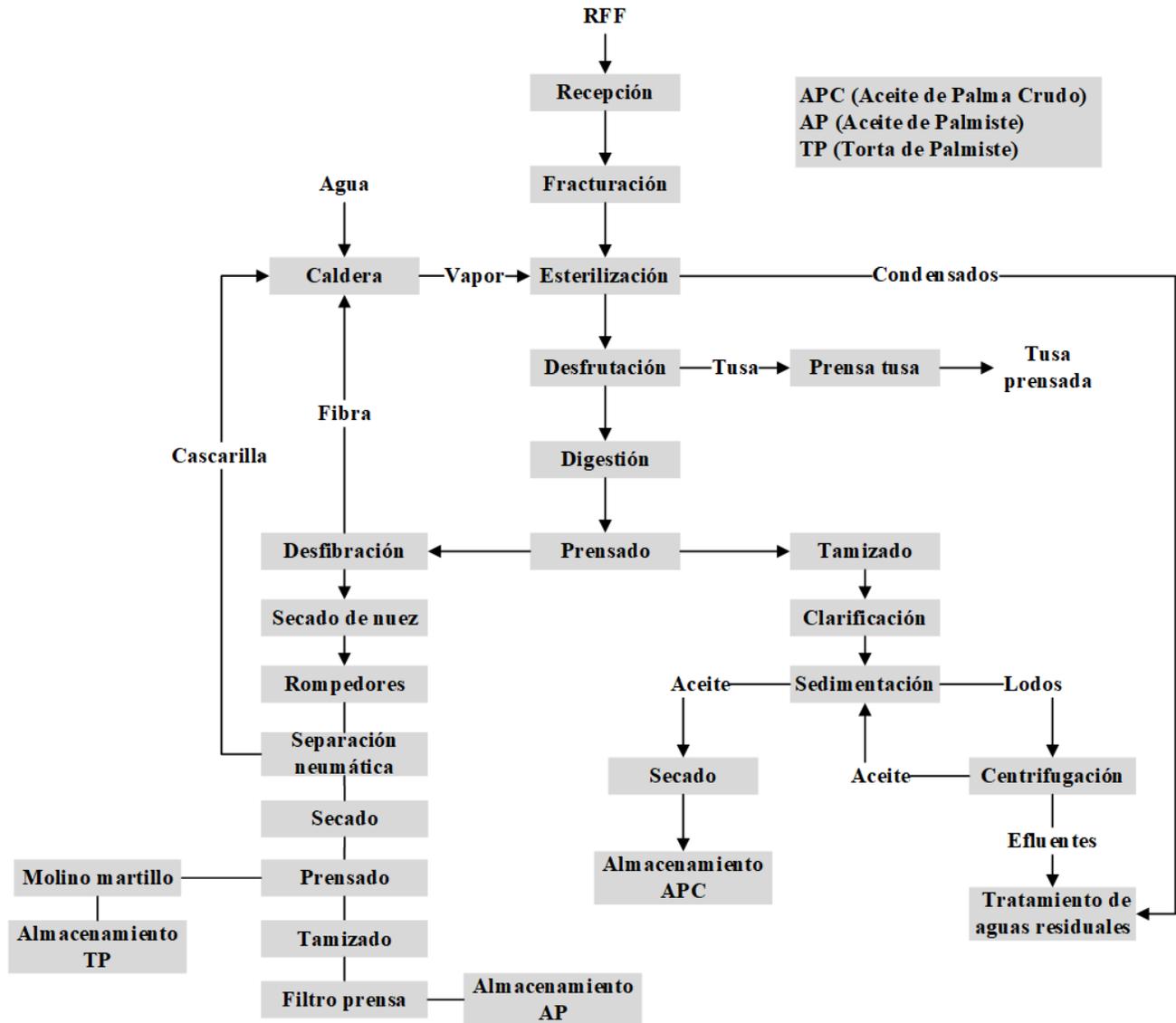
- Martínez Valencia, L. P. (2009). *Evaluación de alternativas para incrementar la eficiencia en la etapa de esterilización y desfrutado en el beneficio de la fruta de palma de aceite*. Fundación Universidad América.
- Menon, N. R. (2013). Process Review: Part 1. *Palm Oil Engineering Bulletin*, 108, 21–34.
- Montgomery, D. C. (2003). *Diseño y análisis de experimentos: Vol. II*. Limusa Wiley.
- Montoya P., L. K., Osorio M., O., & Cerón C., A. F. (2013). PHYSICOCHEMICAL POST-HARVEST CHANGES THAT AFFECT THE QUALITY OF PALM CLUSTERS *Elaeis oleifera* (Kunth) Cortés x *Elaeis guineensis* Jacq. *REVISTA DE CIENCIAS AGRÍCOLAS*, 10.
- Mulligan, G. A. (2010). El único esterilizador oblicuo. *Palmas*, 31, 40–45.
- Ngue Benoit Constant, L. L., Bille Hermine, N., Mva Armand, N., Ntsefong Godswill, N., Pacome Etienne, L. I., & Martin Bell, J. (2020). Variability of Crude Palm Oil Acidity Among Individual Oil Palm (*Elaeis Guineensis* Jacq.) Progenies of La Dibamba Germplasm. *World Journal of Agriculture and Soil Science*, 4(2), 8. <https://doi.org/10.33552/wjass.2020.04.000583>
- Ojeda Nitola, J. (1991). Esterilización. *Palmas*, 12, 109–111.
- Pelaéz, C. M. (2010). Buenas prácticas de procesamiento en plantas de beneficio: estudio de caso. *Palmas*, 31, 65–73.
- Prada Chaparro, F., & Romero Angulo, H. M. (2012). Muestreo y análisis de racimos en el cultivo de la palma de aceite. In *Tecnologías para la agroindustria de la palma de aceite: guía para facilitadores* (pp. 1–158). www.cenipalma.org

- Roa Espitia, S. A., Cayón Salinas, D. G., & Beltrán Giraldo, J. A. (2014). *Resúmenes de la investigación sobre palma de aceite en Colombia de 1960 a 2010*. Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite-Fedepalma.
- Thang, Y. M., Yunus, R., Mokhtar, M. N., Appleton, D. R., Asis, A. J., Kong, P. S., Teh, H. F., & Ariffin, A. A. (2021). Roles and principles of sterilisation process in palm oil mills. *Pertanika Journal of Science and Technology*, 29(4), 2705–2722.
<https://doi.org/10.47836/PJST.29.4.26>
- Turchetti, M. (2006). *Tabla de propiedades termodinámicas del agua* (4th ed.). Editorial de la Universidad Católica Argentina.
- Wambeck, N. (1999). Planta de extracción de aceite de palma: sistemas y procesos. In *Sinopsis del proceso de la palma de aceite* (Vol. 1, p. 64).
- Wambeck, N. (2007). Desarrollo actual de la esterilización. *Palmas*, 28(2), 113–118.
- Yáñez Angarita, E. E., García Núñez, J. A., & Martínez Valencia, L. P. (2010). Esterilización de racimos de fruta de palma. In *Tecnologías para la agroindustria de la palma de aceite: Guía para facilitadores*. (pp. 1–86).
- Yunda, O. T. (200 C.E.). Factors that influence on the yield and efficiencies for the extraction of palm kernel oil. *PALMAS*, 9.

Apéndices

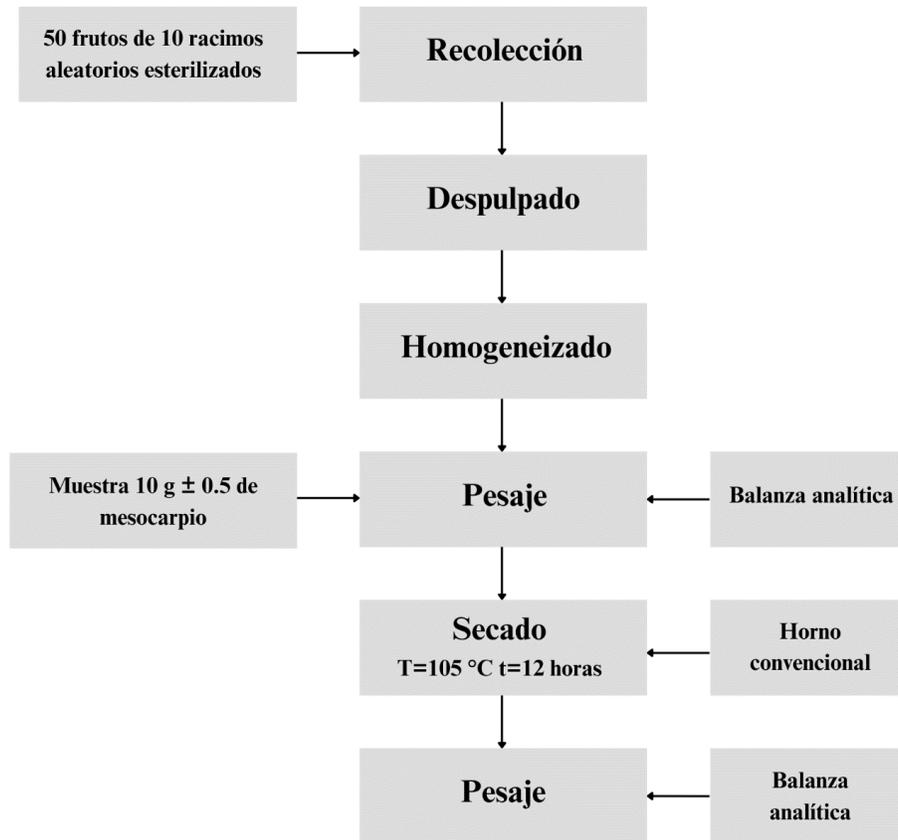
Apéndice A.

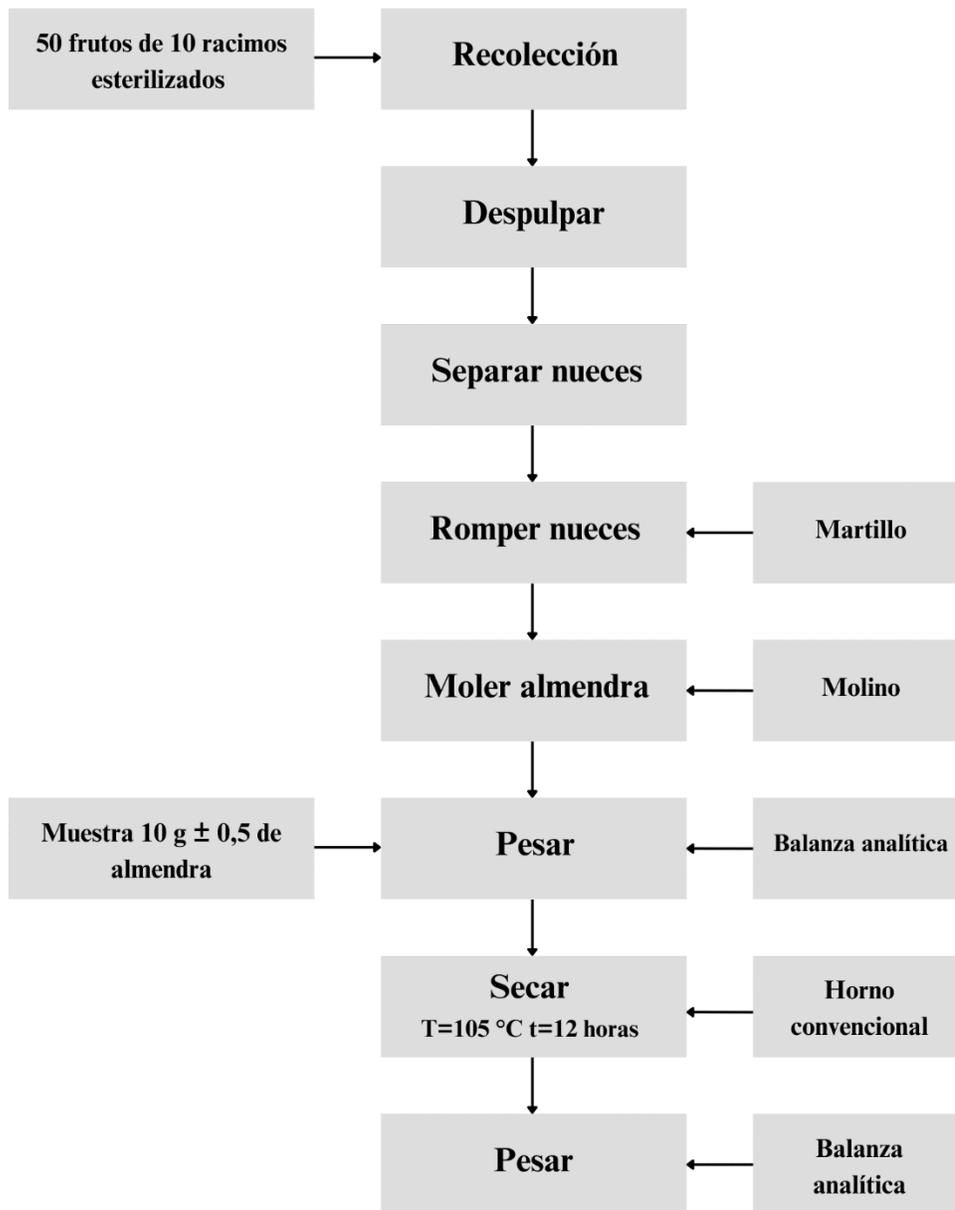
Proceso de extracción de APC, AP y TP en la empresa PPW



Apéndice B.

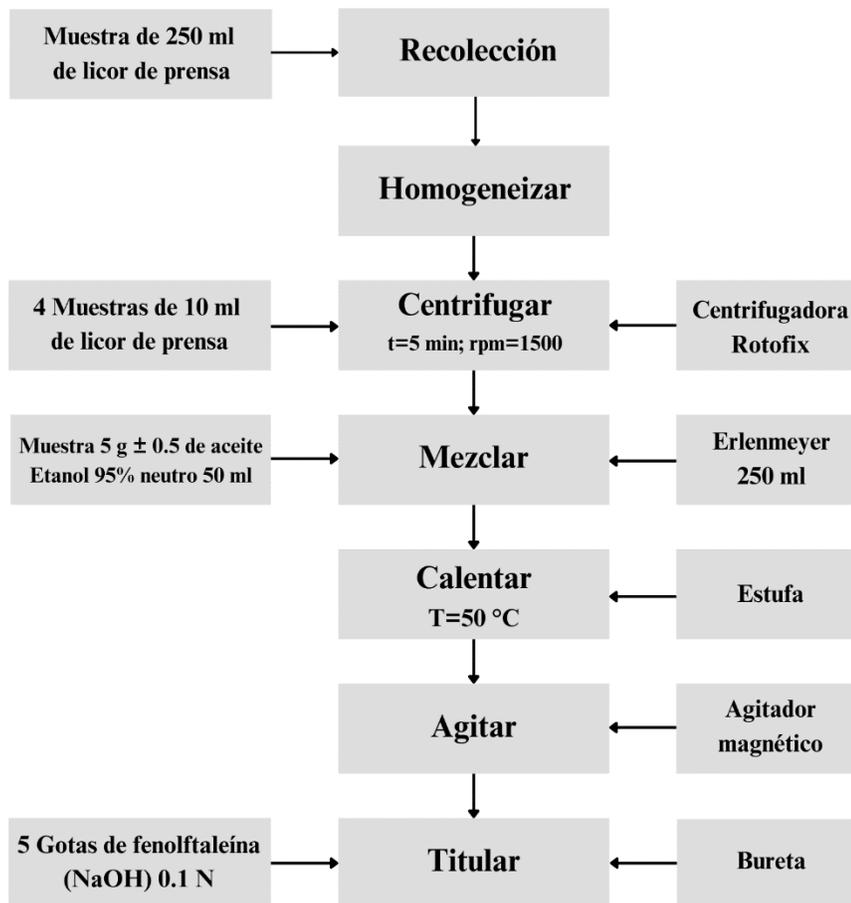
Determinación de la humedad para muestras mesocarpio esterilizado



Apéndice C.*Determinación de la humedad para muestras de almendras esterilizadas*

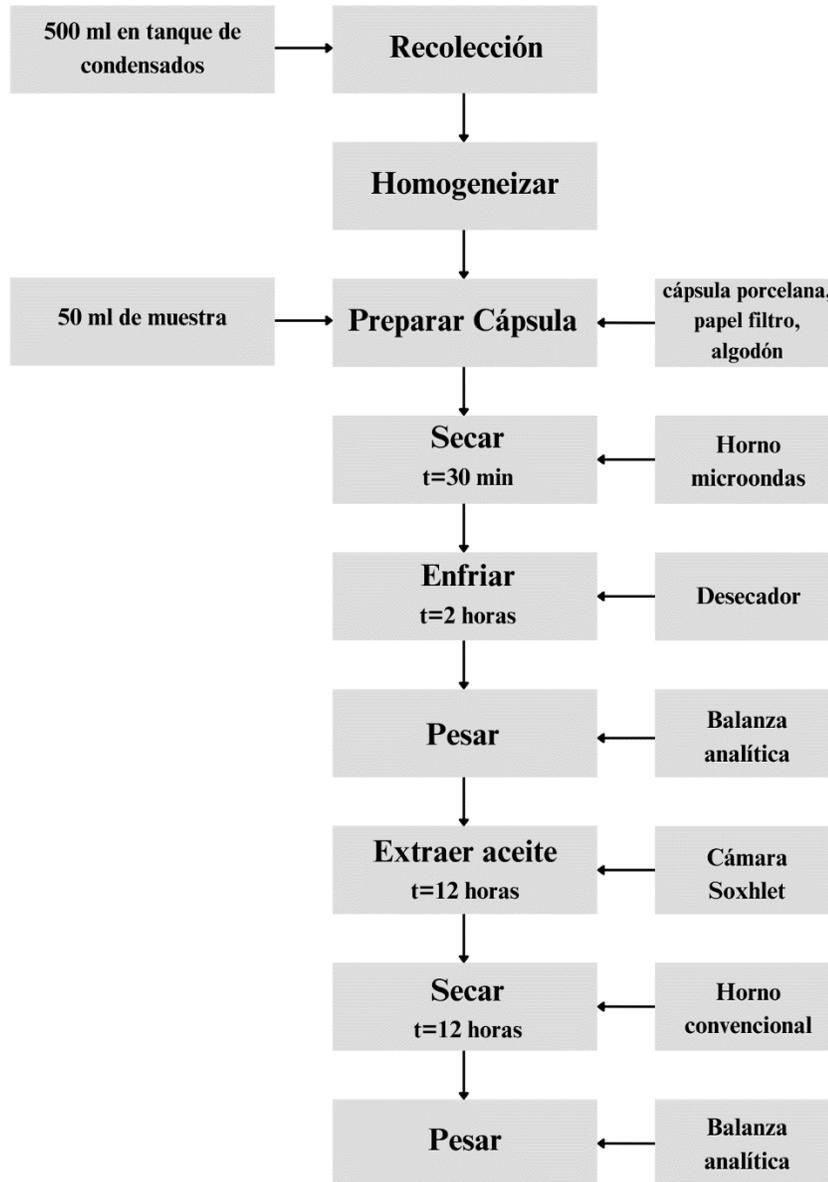
Apéndice D.

Determinación de la concentración de AGL en el aceite de muestras de licor de prensa de racimos esterilizados



Apéndice E.

Determinación de la cantidad de aceite presente en muestras de condensados de esterilización



Apéndice F. *Análisis estadístico de las variables analizadas en los ciclos de esterilización*

Para determinar si el efecto de la desaireación y de los tiempos de sostenimiento en los ciclos de esterilización evaluados fueron significativos en las variables evaluadas, se realizó un análisis de varianza (Montgomery, 2003).

En este análisis se planteó la siguiente hipótesis nula y alternativa para todos los casos.

$$H_0: \mu_{\text{antes del cambio}} = \mu_{\text{después del cambio}}$$

$$H_1: \mu_{\text{antes del cambio}} \neq \mu_{\text{después del cambio}}$$

La hipótesis nula establece que todas las medias (μ) de la población son iguales, mientras que la hipótesis alternativa establece que al menos una de estas es diferente.

Con el fin de determinar si las diferencias entre las medias son estadísticamente significativas, se comparó el valor de p con el nivel de significancia para evaluar la hipótesis nula. El nivel de significancia (denotado como α o alfa) se estableció como 0.05. Un nivel de significancia de 0.05 indica un riesgo de 5% de concluir si existe una diferencia cuando no hay una diferencia real.

Si el valor $p \leq \alpha$: Las diferencias entre algunas de las medias de la población son estadísticamente significativas.

Si el valor $p > \alpha$: Las diferencias entre las medias de la población no son estadísticamente significativas. Si el valor de p es mayor que el nivel de significancia, no se cuenta con suficiente evidencia para rechazar la hipótesis que plantea que las medias de población son todas iguales.

Tabla F1.*Análisis de varianza del efecto de la desaireación en los ciclos de esterilización para el cultivar**D×P*

	Humedad en mesocarpio		Humedad en almendra		Acidez en el aceite		Aceite presente en condensados		Racimos mal desfrutados	
	Entre grupos	Dentro de los grupos	Entre grupos	Dentro de los grupos	Entre grupos	Dentro de los grupos	Entre grupos	Dentro de los grupos	Entre grupos	Dentro de los grupos
Suma de cuadrados	1.34	705.19	1.69	250.50	0.01	1.14	0.35	97.25	1.25	95.30
Grados de libertad	1	28	1	18	1	18	1	8	1	18
Promedio de los cuadrados	1.34	25.19	1.69	13.92	0.01	0.06	0.35	12.16	1.25	5.29
F	0.05		0.12		0.16		0.03		0.24	
Probabilidad (p)	0.82		0.73		0.69		0.87		0.63	
Valor crítico para F	4.20		4.41		4.41		5.32		4.41	
	No hay efecto		No hay efecto		No hay efecto		No hay efecto		No hay efecto	

Tabla F2.*Análisis de varianza del efecto de la desaireación en los ciclos de esterilización para el cultivar**O×G*

	Humedad en mesocarpio		Humedad en almendra		Acidez en el aceite		Aceite presente en condensados		Racimos mal desfrutados	
	Entre grupos	Dentro de los grupos	Entre grupos	Dentro de los grupos	Entre grupos	Dentro de los grupos	Entre grupos	Dentro de los grupos	Entre grupos	Dentro de los grupos
Suma de cuadrados	4.30	791.38	3.27	284.16	0.01	1.55	1.64	95.77	1.25	87.30
Grados de libertad	1	28	1	18	1	18	1	8.00	1	18
Promedio de los cuadrados	4.30	28.26	3.27	15.79	0.01	0.09	1.64	11.97	1.25	4.85
F	0.15		0.21		0.06		0.14		0.26	
Probabilidad (p)	0.70		0.65		0.80		0.72		0.62	
Valor crítico para F	4.20		4.41		4.41		5.32		3.89	
	No hay efecto		No hay efecto		No hay efecto		No hay efecto		No hay efecto	

Tabla F3.

Análisis de varianza del efecto de los tiempos de sostenimiento en los ciclos de esterilización para el cultivar D×P

	Humedad en mesocarpio		Humedad en almendra		Acidez en el aceite		Aceite presente en condensados		Racimos mal desfrutados	
	Entre grupos	Dentro de los grupos	Entre grupos	Dentro de los grupos	Entre grupos	Dentro de los grupos	Entre grupos	Dentro de los grupos	Entre grupos	Dentro de los grupos
Suma de cuadrados	7.60	306.82	3.36	40.40	0.01	0.75	6.93	289.49	0.47	175.70
Grados de libertad	2	12	2	12	2	12	2	12	2	27
Promedio de los cuadrados	3.80	25.57	1.68	3.37	0.00	0.06	3.47	24.12	0.23	6.51
F		0.15		0.50		0.06		0.14		0.04
Probabilidad (p)		0.86		0.62		0.94		0.87		0.96
Valor crítico para F		3.89		3.89		3.89		3.89		3.35
		No hay efecto		No hay efecto		No hay efecto		No hay efecto		No hay efecto

Tabla F4.

Análisis de varianza del efecto de los tiempos de sostenimiento en los ciclos de esterilización para el cultivar O×G

	Humedad en mesocarpio		Humedad en almendra		Acidez en el aceite		Aceite presente en condensados		Racimos mal desfrutados	
	Entre grupos	Dentro de los grupos	Entre grupos	Dentro de los grupos	Entre grupos	Dentro de los grupos	Entre grupos	Dentro de los grupos	Entre grupos	Dentro de los grupos
Suma de cuadrados	3.50	203.47	5.42	31.17	0.01	0.66	2.96	167.70	3.27	190.10
Grados de libertad	2	12	2	12	2	12	2	12	2	27
Promedio de los cuadrados	1.75	16.96	2.71	2.60	0.00	0.06	1.48	13.98	1.63	7.04
F		0.10		1.04		0.09		0.11		0.23
Probabilidad (p)		0.90		0.38		0.92		0.90		0.79
Valor crítico para F		3.89		3.89		3.89		3.89		3.35
		No hay efecto		No hay efecto		No hay efecto		No hay efecto		No hay efecto