

Disminución de las impurezas en el flujo de salida de las columnas neumáticas de almendra-cáscara en la empresa Palmeras de Puerto Wilches S.A.

María Camila Quintero Borja

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniera Química

Directora

Viviana Sánchez Torres

Ingeniera Química, Ph. D

Codirector

Óscar Mauricio Díaz Rodríguez

Ingeniero Químico, MSc.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2020

Agradecimientos

Agradezco a Palmeras de Puerto Wilches S.A por la oportunidad, al ingeniero Óscar Díaz y a la profesora Viviana Sánchez por su dirección y comprensión. A la Universidad Industrial de Santander y en especial a los docentes de la escuela de Ingeniería Química por la enseñanza y por hacerme amar esta hermosa profesión.

Dedicatoria

Porque la vida me enseñó que lo mejor de este mundo es el amor de mi familia, a ellos les dedico este logro. A mi madre y padre gracias por su apoyo y amor incondicional. A mis hermanos por su compañía.

A Paula R y Alejandra por su compañía y apoyo en este recorrido. A Julieth G porque me animas a mejorar cada día.

A mi tía que desde el cielo sé que nos cuidas, fue injusta tu partida. Cada día estás en mis pensamientos.

Contenido

Introducción	12
1. Objetivos	21
1.1 Objetivo general.....	21
1.2 Objetivos específicos	21
2. Alcance.....	21
3. Metodología	22
4.1 Reconocimiento de los equipos.....	22
4.2 Diagnóstico del estado inicial de operación	23
4.2.1 Medición de las condiciones de operación en los rompedores.	23
4.2.2 Medición de las condiciones de operación en las columnas de separación neumática.....	23
4.3 Definición de las condiciones de operación	25
4.3.1 Estimación de las condiciones de operación de los rompedores	25
4.3.2 Estimación de los parámetros de operación de las columnas:.....	25
4.4 Evaluación de los cambios propuestos.....	26
4.5 Diseño del esquema preliminar de control.....	27
4.6 Tareas desarrolladas durante la práctica empresarial	27
5 Resultados	28
5.1 Rompedores de nuez	28
5.1.1 Reconocimiento de los rompedores	28

DISMINUCIÓN DE IMPUREZAS EN COLUMNAS NEUMÁTICAS	5
5.1.2 Medición de las condiciones de operación de los rompedores.	29
5.1.3 Ajustes realizados en los rompedores	32
5.2 Columnas de separación neumáticas.....	34
5.2.1 Reconocimiento de las columnas	34
5.2.2 Medición de las condiciones de operación en las columnas de separación	35
5.2.3 Caracterización del caudal de aire en las columnas	37
5.3 Ajustes realizados en las columnas	38
5.4 Esquema preliminar del sistema de control.....	41
6 Conclusiones.....	43
7. Recomendaciones.....	43
Bibliografía.....	44
Anexos.....	46

Lista de tablas

Tabla 1. Valores de referencia para la relación aire/material en columnas de separación neumática	19
Tabla 2. Tamices de la serie Tyler para análisis de distribución de tamaño.	24
Tabla 3. Actividades desarrolladas durante la práctica empresarial.	27
Tabla 4. Condiciones de operación de los rompedores	29
Tabla 5. Flujo máxicos y composiciones en las columnas de separación neumáticas	36
Tabla 6. Relación kg de aire/kg mezcla triturada.....	36
Tabla 7. Ajustes realizados en las zonas de separación	39

Lista de figuras

Figura 1. Fruto de la palma de aceite	12
Figura 2. Diagrama de bloque de la sección de palmistería y planta palmiste	13
Figura 3. Vista lateral de un rompedor de nuez o ripple mill.....	15
Figura 4. Columnas de separación neumática de almendra-cáscara.	17
Figura 5. Zona de separación de la columna.....	18
Figura 6. Etapas metodológicas del proyecto.....	22
Figura 7. Distribución de tamaño de la nuez entera y parcialmente rota presente en el flujo de almendra	30
Figura 8. Distribución de tamaño de la nuez entera y parcialmente rota a la entrada de los rompedores	31
Figura 9. Distribución de tamaño de la nuez entera y parcialmente rota a la salida de los rompedores	31
Figura 10. Vista lateral del rompedor. a) estado del equipo antes de cambios (presencia de hoyos en las placas) dónde (i) muestra los hoyos presentes en la placa lateral y las barras giradas en posición cuadrada y b) estado físico del equipo después de cambio de placas laterales. (ii) barras fijas en posición rómbica y (iii) ubicación del tensor.	33
Figura 11. Composición de la nuez entera y parcialmente rota en el flujo de almendra antes y después de los cambios realizados en los rompedores	33
Figura 12. Curva de operación del ventilador de la primera columna.	37
Figura 13. Curva de operación del ventilador de la segunda columna.	38
Figura 14. Condiciones de operación de las columnas. a) Valores de la velocidad del aire antes de realizar los ajustes. b) Valores de la velocidad del aire después de realizar los ajustes.	39

Figura 15. Composición másica del flujo de almendra antes de después de los ajustes realizados	40
Figura 16. Porcentaje de impurezas y pérdidas de almendra en la primera y segunda columna	40
Figura 17. Esquema preliminar del sistema de control	42

Lista de anexos

Anexo A. Diagrama de la zona de palmistería en la empresa Palmeras de Puerto Wilches S.A...	46
Anexo B. Análisis estadístico de los cambios realizados en los rompedores y las columnas neumáticas	47
Anexo C. Modificación propuesta para la tolva de retención de nuez a la entrada del rompedor 1.	54
Anexo D. Caracterización de los flujos máxicos de la zona de palmistería para el año 2019.	56
Anexo E. Distribución de tamaños de nuez entera, nuez parcialmente rota, almendra entera, almendra rota y cáscara en la entrada y salida de cada columna	60
Anexo F. Velocidades de fluidización y arrastre teórica y experimental para tamaños determinados de nuez entera, nuez parcialmente rota, almendra entera, almendra rota y cáscara suelta en las columnas de separación.....	64
Anexo G. Instructivo de operación de las columnas de separación neumáticas	65

Resumen

- Título:** Disminución de las impurezas en el flujo de salida de las columnas neumáticas de almendra-cáscara en la empresa Palmeras de Puerto Wilches S.A.*
- Autor:** María Camila Quintero Borja **
- Palabras clave:** Separación neumática, impurezas, almendra, palmiste, rompedores
- Descripción:**

Palmeras de Puerto Wilches S.A es una empresa dedicada al cultivo y cosecha de la palma de aceite, así como la producción de aceite de palma y aceite de almendra (aceite de palmiste), de este proceso se obtiene como coproducto la torta de palmiste. Por ende, es necesario controlar el proceso de extracción y producción de la almendra. En el flujo de almendra se presentaban entre 18 y 20% de impurezas, que generaban una disminución de la extracción de aceite y un aumento de la cantidad de cáscara en la torta de palmiste, lo cual disminuía su valor nutricional. Debido a esto, se realizaron ajustes en las columnas de separación neumática tales como, la variación del caudal de aire a la entrada y la modificación de la velocidad en las zonas de separación. De igual forma, se realizaron cambios en la infraestructura de los rompedores de nuez. Los cambios realizados permitieron aumentar la eficiencia de rompimiento de la nuez de 85% a 93%, disminuir la cantidad de cáscara como impurezas en el flujo de almendra de 8.9 a 5.6% y disminuir las impurezas totales de 18.7% a 14.6%, aumentando el porcentaje de la extracción de aceite de 35 a 38% y, de igual forma, aumentó la calidad de la torta de palmiste al disminuir el porcentaje de cáscara en ella. Finalmente se propuso un esquema preliminar para un sistema de control que permita automatizar el proceso.

*Trabajo de grado

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Ingeniera Química. Ph.D. Viviana Sánchez Torres. Codirector: Ingeniero Químico. MSc. Óscar Mauricio Díaz Rodríguez.

Abstract

Title: Impurities decrease in the kernel-shell pneumatic columns outlet flow in Palmeras de Puerto Wilches S.A. company *

Author: María Camila Quintero Borja **

Keywords: Pneumatic separation, impurities, kernel, palm kernel, ripple-mill

Description:

Palmeras de Puerto Wilches S.A is a company dedicated to the cultivation and harvest of oil palm, as well as the production of palm oil and palm kernel oil, from this process palm kernel cake is obtained as a byproduct. Therefore, it is necessary to control the extraction and production process of the kernel. In the kernel flow, there were between 18 and 20% of impurities, which generated a decrease in oil extraction and an increase in the amount of shell in palm kernel cake, which decreased its nutritional value. Due to this, adjustments were made in the pneumatic separation columns such as the variation of the airflow at the inlet and the modification of the speed in the separation zones. Similarly, physical changes were made to the ripple mills. The changes made allowed to increase the shell breaking efficiency from 85% to 93%, decrease the amount of shell as impurities in the kernel flow from 8.9 to 5.6% and decrease the total impurities from 18.7% to 14.6%, increasing the percentage of oil extraction from 35 to 38% and, in the same way, the quality of palm kernel cake increased by decreasing the percentage of shell in it. Finally, a preliminary scheme was proposed for a control system that would automate the process.

*Bachelor Thesis

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Ingeniera Química. Ph.D. Viviana Sánchez Torres. Codirector: Ingeniero Químico. MSc. Óscar Mauricio Díaz Rodríguez.

Introducción

Palmeras de Puerto Wilches S.A (PPW) es una empresa con una trayectoria de más de 30 años en el sector palmicultor, se dedica a la cosecha del fruto de palma aceitera, a la producción y comercialización de aceite crudo de palma (CPO), aceite crudo de almendra o palmiste (PKO) y subproductos como torta de palmiste, chocolatina y cascarilla. Ésta se encuentra ubicada en el Km 8 vía Puerto Wilches, Santander y posee una capacidad de procesamiento de más de 30 t/h de racimo de fruto fresco (RFF) en proceso de expansión a 45 t/h de RFF. Para el año 2019 se procesaron 117026.9 t de RFF y produjo 38739 t de CPO, 4347 t de PKO y 7806.9 t de torta de palmiste.

El fruto de la palma de aceite está compuesto por el mesocarpio o fibra de donde se extrae CPO, en su interior se encuentra la almendra o palmiste que está recubierta por un cuesco o cáscara, como se observa en la Figura 1. El conjunto almendra-cáscara se conoce como nuez de palma (Mathews, Lee, & Rao, 2004).

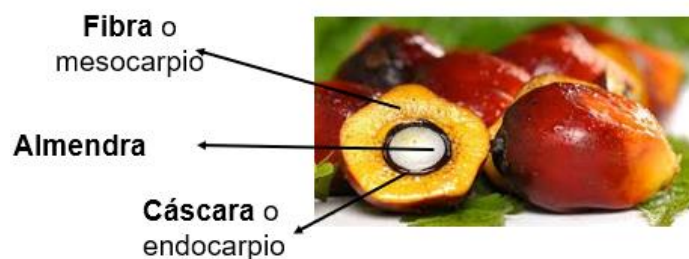


Figura 1. Fruto de la palma de aceite. Adaptado de: (Ura, n.d.)

El proceso de extracción y recuperación de la almendra se da en la zona de palmistería y en la zona de planta palmiste se realiza la producción de aceite, torta de palmiste y chocolatina, la cual se muestra en el Anexo A.

En la Figura 2 se presenta el diagrama de bloques del proceso ocurrido en la zona de palmistería y planta palmiste, donde después de extraer el aceite crudo de palma, inicia el proceso

de desfibración que separa la nuez de la fibra en una columna neumática. En la columna, la fibra es arrastrada con el uso de una corriente de aire y posteriormente es utilizada para la combustión en las calderas. La nuez separada es depositada en un silo acondicionador de nuez para disminuir su humedad y así volver la cáscara más quebradiza. Las nueces ya secas salen del silo de almacenamiento y se alimentan a un tambor clasificador, donde se realiza su separación por tamaños (12, 14, 20 mm), además cuenta con una salida para tamaños mayores de 20 mm que son reprocesados. Cada lote, según su tamaño, es enviado a los “rompedores de nueces” que rompen la nuez y separan la cáscara de la almendra. La mezcla triturada ingresa a dos columnas de separación neumática dispuestas en serie donde la cáscara es arrastrada por una corriente de aire y llevada a una tolva de almacenamiento, para luego ser comercializada o quemada en las calderas. La mezcla restante cae a un transportador sinfín y después es ingresada a silos de secado donde se disminuye la humedad a alrededor de 4%. Posteriormente la mezcla es transportada hasta prensas monotornillo o expellers donde se obtienen como subproductos el aceite y el material sólido prensado, llamado torta de palmiste. El aceite extraído es pasado a un filtro prensa y posteriormente es almacenado para su comercialización. El material particulado que queda atrapado en el filtro prensa es la chocolatina que también es comercializada (Gaitán & Castillo, n.d.)(Series & Science, 2018)(Wambeck, 1999).

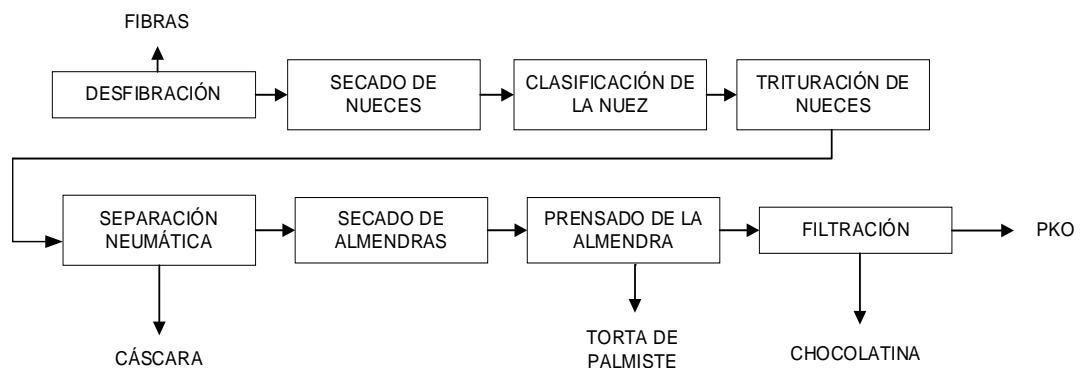


Figura 2. Diagrama de bloque de la sección de palmistería y planta palmiste

El PKO es ampliamente utilizado en aplicaciones alimentarias, incluida la producción de margarina, grasa de confitería y manteca, debido a que la almendra posee entre 47 a 50% de aceite que es rico en ácido láurico (45%-52%) ácido mirístico (15%–17%) y ácido oleico (13%–19%). Además, la torta de palmiste y la chocolatina, son utilizadas para alimentación animal por su alto contenido proteico (Rubiano, 1998)(Halim, Ramli, Rahmat, Mat, & May, 2016)(Garcés & Sánchez, 1997)(Pantzaris, Jaaffarahmad, Origen, & Aceite, 2002). Por esta razón, es necesario controlar el proceso de extracción de almendra y cumplir con los parámetros de calidad requeridos, como bajo contenido de impureza y de humedad, los cuales se ven directamente afectados por los rompedores, columnas de separación neumática y secado en los silos (Series & Science, 2018).

Actualmente, el flujo de almendra a la salida de las columnas neumáticas está compuesto por nuez entera, nuez parcialmente rota, almendra entera, almendra rota y cáscara suelta, siendo la cáscara suelta, la cáscara contenida en la nuez entera y la cáscara contenida en la nuez parcialmente rota lo que representa impurezas con valores de alrededor de 18 a 20%, los cuales están por encima de los parámetros definidos por la empresa (12%).

El alto contenido de impurezas disminuye la extracción de aceite y la calidad de la torta de palmiste (Rubiano, 1998). Además, la maquinaria como las prensas monotornillo de almendra sufren un mayor desgaste debido a que la cáscara es dura y abrasiva. Por esta razón, este proyecto se centra en mejorar las condiciones de operación de los rompedores y columnas de separación neumática para disminuir el contenido de impurezas en el flujo de almendra. Con esto se logra aumentar la extracción de aceite, disminuir las pérdidas de PKO por impregnación en la cáscara, aumentar el volumen de procesamiento de almendra y aumentar la eficiencia de las prensas monotornillo y, por ende, disminuir los costos de mantenimiento (Alberto, Lara, Laboratorio, Luis, & Ávila, n.d.).

Al realizar los ajustes en las columnas de separación se debe tener en cuenta que la corriente de aire arrastra cáscara y almendra rota de menor tamaño como pérdida. Investigaciones en Cenipalma concluyeron que de la pérdida total de la almendra en la planta, en el proceso de desfibración es de alrededor del 70% y de 15 y 30% en el sistema de separación almendra-cáscara, dando una pérdida total de 1 a 1.3% de almendra por RFF (Zone, n.d.)(Suárez et al., 2000).

Funcionamiento de los rompedores

En la Figura 3 se muestra la configuración de un rompedor de nuez, donde las nueces entran al equipo a través de un conducto en la parte superior, dirigiéndose hacia un rotor que tiene barras circulares de acero endurecido, las cuales impulsan la nuez hacia una placa fija de impacto o hacia barras de área transversal cuadradas dispuestas en arco a un costado del rompedor. El rotor imparte diferentes velocidades y fuerzas a la nuez a medida que pasa por el rompedor, permitiéndole romper la cáscara de la nuez y liberar la almendra contenida (Hamblin, Amiento, La, Sobre, & Operacion, 1991).

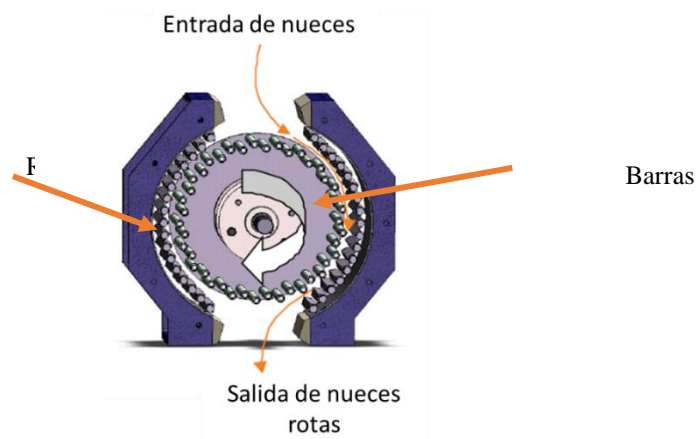


Figura 3. Vista lateral de un rompedor de nuez o ripple mill. Tomado de:(A, n.d.)

La eficiencia de los rompedores depende de factores como la velocidad del rotor, la cantidad de fibra adherida que no fue separada en la desfibración, el apropiado acondicionamiento

de la nuez en el silo y la homogeneidad en el tamaño y tipo de las nueces alimentadas (Leon, 2004). Además, algunos cambios realizados en los rompedores como el aumento del diámetro de los platos externos del rotor, el acortamiento de la distancia entre el rotor y la placa de desgaste, cambios de barras circulares del rotor por bujes tratados térmicamente, han disminuido los costos de mantenimiento sustancialmente y aumentado la eficiencia de los rompedores de 92% a 96% (Mesa, n.d.).

La nuez entera y la nuez parcialmente rota poseen alrededor de 45 y 38% de cáscara respectivamente, por lo tanto, un alto contenido de estas a la salida de los rompedores refleja un aumento en el contenido de impurezas del flujo de almendra (Menon, n.d.-a).

Funcionamiento de las columnas de separación neumática

A las columnas de separación de almendra-cáscara ingresa la mezcla triturada, en donde la cáscara es fluidizada por la corriente de aire que le ingresa y es separada de la almendra que cae por gravedad a un transportador para ser llevadas a los silos de secado. Las columnas de separación neumática están compuestas por dos secciones o zonas de separación, una salida intermedia, un ventilador colocado en succión que genera la corriente de aire y un ciclón, como se muestra en la Figura 4. En el ciclón se separa la cáscara o material particulado que cae desde la pared cilíndrica superior hacia la parte inferior del cono debido a la centrifugación causada por la fuerza del aire, y el aire sale por un tubo superior hacia el ventilador donde y a su vez es expulsado a la atmósfera (Leon, 2004).

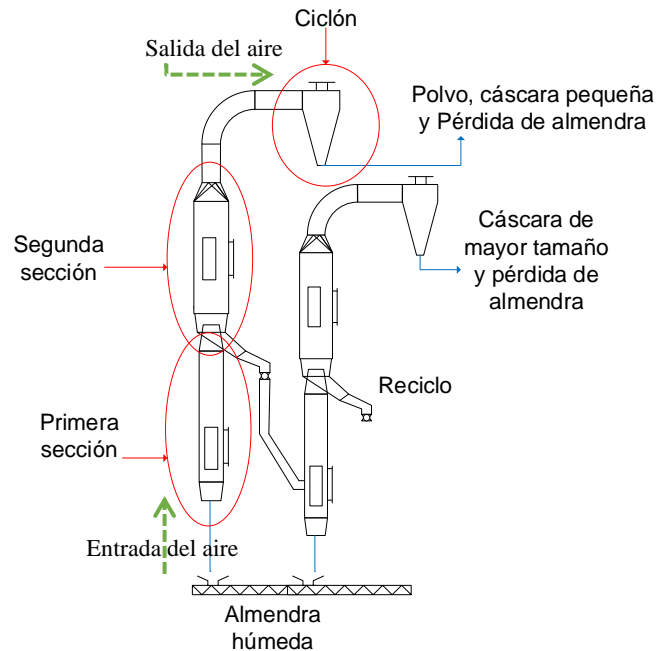


Figura 4. Columnas de separación neumática de almendra-cáscara.

PPW cuenta con dos columnas dispuestas en serie, como se observa en la Figura 4. La mezcla triturada que ha salido de los rompedores ingresa a la primera sección de la primera columna donde la almendra, la nuez entera y la nuez parcialmente rota que no han sido arrastradas por la corriente de aire caen por gravedad a un sinfín transportador. En la salida superior sale la cáscara liviana, polvo y almendra rota de menor tamaño considerada como pérdida. Por la salida intermedia pasa almendra entera y rota, nuez entera y parcialmente rota de menor tamaño, así como cáscara de mayor tamaño que no fue arrastrada e ingresan a la primera sección de la segunda columna donde se presenta la separación descrita anteriormente.

La separación neumática se deriva de la operación de fluidización, donde hay que vencer la velocidad de arrastre en el lecho para dar inicio al arrastre de sólidos en el fluido (Leon, 2004). Por esto, se hace necesario controlar el caudal de aire que le ingresa a cada columna y la velocidad de este en cada zona de separación. Cada sección de la columna cuenta con un dámper o pared

móvil que permite variar el área de operación o área de circulación de la mezcla triturada, y así poder controlar la velocidad del aire en cada zona, como se muestra en la Figura 5.

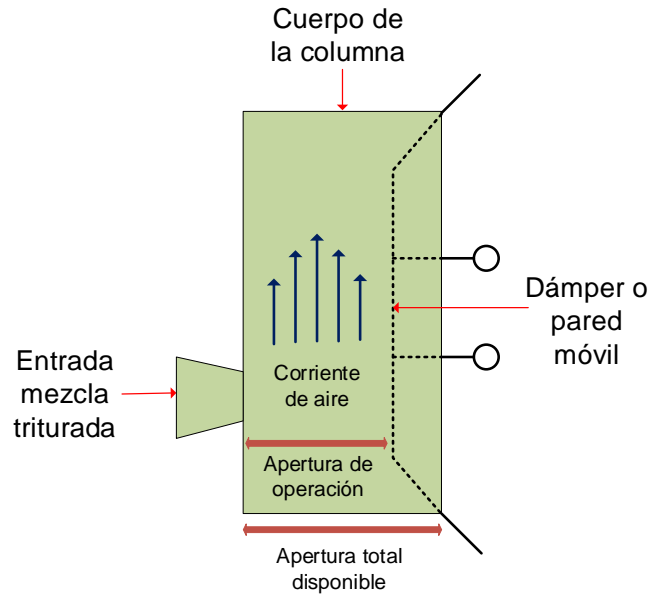


Figura 5. Zona de separación de la columna

La Corporación Centro de Investigación en Palma de Aceite (Cenipalma) en su boletín técnico 27 presenta la sintonización de las columnas neumáticas en la zona de palmistería, donde plantea los pasos a seguir para ajustar las columnas de acuerdo con el flujo de masa procesado, teniendo en cuenta la relación másica de aire/mezcla triturada procesada en cada columna, como se muestra en la Tabla 1. Además, recomienda para la primera columna velocidades de 15 m/s en la primera zona y de 12 m/s en la segunda zona (Wambeck, 1999) (Cala A, Yáñez Angarita, & García Núñez, 2011) (Case, 2010).

Tabla 1

Valores de referencia para la relación aire/material en columnas de separación neumática.

Parámetros de referencia	Relación kg aire/kg material (capacidad del sistema)
Literatura	6-9 kg aire/kg fibra (18% fibra/RFF)
	4-6 kg aire/kg mezcla triturada (11% mezcla triturada/RFF)
Otros valores normalmente	900-1000 kg fibra/t RFF procesado
usados	600-650 kg mezcla triturada/t RFF procesado

Fundamento velocidad mínima de fluidización y de arrastre

La separación neumática se debe al principio de fluidización y arrastre, el cual describe el comportamiento de un lecho empacado cuando es atravesado por un fluido que corre de abajo hacia arriba. Cuando se presentan bajas velocidades las partículas permanecen estacionarias, pero al aumentar la velocidad del fluido la caída de presión aumenta de acuerdo con la ecuación de Ergun (Ec. 1) (Geankoplis, 1998). Si sigue aumentando la velocidad, llegará un momento en que la fuerza de presión iguala a la fuerza gravitatoria sobre la masa de las partículas y las partículas empezarán a moverse (McCabe, Smith, & Harriot, 2007).

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{150V_{mf}\mu(1-\varepsilon)^2}{\varphi_s^2 D_p^2 \varepsilon^2} + \frac{1.75\rho V_{mf}^2}{\varphi_s D_p} * \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \quad (1)$$

Donde, Δp es la caída de presión, L es la altura del lecho, V_{mf} es la velocidad mínima de fluidización, μ es la viscosidad del aire, ε es la porosidad del lecho, ρ es la densidad del aire, φ es la esfericidad de la partícula y D_p es el diámetro de partícula.

Una vez que el lecho está fluidizado, la caída de presión permanece constante, mientras la altura del lecho continúa creciendo al aumentar el flujo del líquido o gas. Finalmente, con una velocidad mayor a la velocidad mínima de fluidización todo el conjunto, lecho y fluido, se comporta como un sistema homogéneo alcanzando la velocidad de arrastre o de transporte para dicho sistema, la cual está dada por la ecuación 2. (Leon, 2004).

$$V_T = \sqrt{\frac{4g(\rho_p - \rho)\phi D_p}{3C_D\rho}} \quad (2)$$

Donde, V_T es la velocidad de arrastre, g es la gravedad, ρ_p es la densidad de la partícula, C_D es el coeficiente de rozamiento.

Debido a lo anterior, es posible separar la almendra de la cáscara en las columnas. La velocidad de arrastre de los componentes de la mezcla triturada es muy variable entre ellos, y por lo tanto, permite la separación y extracción de la almendra dado que, la cáscara posee menores velocidades de arrastre con respecto a la almendra y así facilita su extracción (*Institusiut Penyelidikan Minyank. Mongana report (translation)*, n.d.) (Menon, n.d.-b).

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Disminuir las impurezas en el flujo de almendra a la salida de las columnas neumáticas de almendra-cáscara en la empresa Palmeras de Puerto Wilches S.A.

1.2 Objetivos específicos

- Realizar un diagnóstico del estado actual y operación de las columnas de separación neumática de almendra-cáscara y los rompedores de nuez.
- Recomendar condiciones de operación para las columnas de separación neumática de almendra-cáscara y los rompedores de nuez.
- Proponer un esquema preliminar de control que permita la automatización de las columnas de separación.

2. Alcance

El alcance del proyecto está dirigido a reducir la cantidad de cáscara, o impurezas, en el flujo de almendra a la salida de las columnas de separación neumáticas y, de igual forma, mantener las pérdidas de almendra en las columnas en un rango aceptable. Esto con el fin de aumentar el porcentaje de extracción de aceite de palmiste (PKO), aumentar la capacidad de producción y mejorar la calidad de la torta de palmiste.

3. Metodología

La metodología aplicada en el proyecto se dividió en las etapas descritas en la Figura 6.

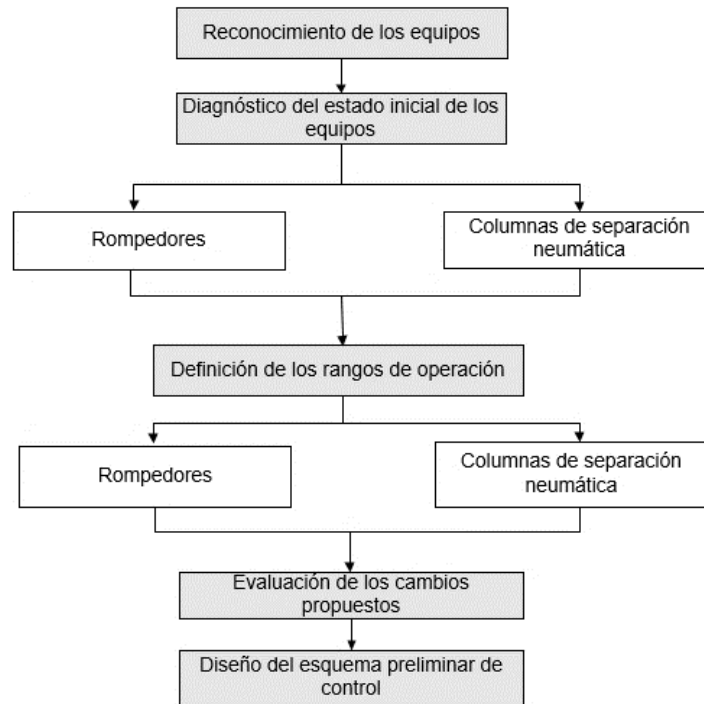


Figura 6. Etapas metodológicas del proyecto

4.1 Reconocimiento de los equipos

Se inició con la revisión de los diagramas de proceso de la zona de palmistería, además de los diagramas de cada equipo y sus especificaciones. Posteriormente, se realizó una inspección visual de los equipos y una revisión del funcionamiento de cada uno. Finalmente se determinaron los puntos de muestreo y posibles mejoras en los equipos.

4.2 Diagnóstico del estado inicial de operación

4.2.1 Medición de las condiciones de operación en los rompedores. Se registró el tipo de rompedor, la capacidad nominal y real, midiendo el flujo másico procesado en 5 min, el tamaño de la nuez a la entrada y salida, utilizando una lámina metálica con aperturas de 9 a 18 mm, la composición del flujo a la salida, tomando una muestra de 300 g cada hora y posteriormente separando la nuez entera, la nuez parcialmente rota, la almendra entera, la almendra rota y la cáscara suelta (Cala, Yáñez, & García, 2011). También, se tuvo en cuenta el tipo de rotor, las revoluciones por minuto utilizando un tacómetro láser de contacto multifuncional TKRT 20, y la eficiencia del rompimiento calculada dependiendo de la composición a la salida con respecto a la composición a la entrada de cada rompedor (Ec.3).

$$\text{Eficiencia(\%)} = \frac{(\text{Nuez Entera y rota entrada}) - (\text{Nuez entera y rota salida})}{(\text{Nuez entera y rota entrada})} * 100\% \quad (3)$$

4.2.2 Medición de las condiciones de operación en las columnas de separación neumática

- **Variables operacionales:** Se registraron el caudal de aire a la entrada de cada columna, utilizando un anemómetro de hélice marca UNI-T referencia UT363 BT, y las características de los ventiladores. Se determinaron la apertura del dámper en cada zona y las aperturas totales disponibles en estas zonas, además de la velocidad del aire en cada sección o zona de separación, utilizando un anemómetro de tubo Pitot marca PCE referencia HVAC2. Esto con el fin de definir las condiciones iniciales de operación y calcular la relación másica entre el caudal de aire y la carga de alimentación definidas en la Tabla 1.

- **Composición de los flujos:** Se registraron los caudales máxicos a la entrada y a la salida de cada columna, así como su composición. Para determinar la composición del flujo de almendra se tomaron muestras de 400 g cada hora, se pesó la fracción de cada componente en una balanza analítica. Esta composición se tuvo en cuenta para establecer la cantidad de cáscara suelta, cáscara contenida en nuez entera y parcialmente rota para determinar las impurezas. Para los flujos de salida en la parte superior de cada columna (compuestos mayormente por cáscara) se tomaron 200 g cada hora y se determinaron las pérdidas de almendra en cada uno de ellos.
- **Velocidad de fluidización y arrastre:** Para medir las dimensiones de partícula y calcular la velocidad de fluidización y arrastre, ecuaciones 1 y 2, se realizó una distribución de tamaño para cada componente en los flujos de entrada y salida de las columnas usando tamices de la serie de Tyler, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2.

Tamices de la serie Tyler para análisis de distribución de tamaño.

# Malla	Apertura [mm]
3/4 pulg	19
1/2 pulg	12.5
3/8 pulg	9.5
4	4.75
8	2.36
10	2

Se tamizaron 500 g de cada componente y, para la masa retenida en cada tamiz, se midió la densidad absoluta tomando 50 g y midiendo el volumen desplazado de agua en probetas de 250 mL, se midió la densidad del lecho tomando 50 g de muestra y se determinó el volumen ocupado, el cálculo de la densidad se realizó aplicando la ρ , posteriormente, con la Ec 6 se determinó la esfericidad para partículas redondeadas como la nuez y la almendra. y con esto, también se determinó la porosidad del lecho. Para calcular la esfericidad se usó el método de los tres ejes, el

cual consiste en medir las tres dimensiones de la partícula y hallar el diámetro equivalente con la Ec 5 y, posteriormente, con la Ec 6 se determinó la esfericidad para partículas redondeadas como la nuez y la almendra.

$$\rho = m * V \quad (4)$$

Donde ρ es la densidad, m la masa y V el volumen.

$$D_e = \sqrt[3]{A * B * C} \quad (5)$$

Donde A, B y C son los tres ejes de la nuez perpendiculares entre sí.

$$\varphi = \frac{A_p}{A_c} \quad (6)$$

Donde A_c es el área del círculo más pequeño que circunscribe el eje de mayor longitud y A_p es el área proyectada, la cual se obtiene con la Ec 7.

$$A_p = \frac{\pi * D_e^2}{4} \quad (7)$$

La determinación de la cantidad de cada muestra analizada y la metodología de medición de velocidades y caudales fueron realizadas teniendo en cuenta lo recomendado en el Manual de procedimientos de laboratorio para plantas de beneficio de Cenipalma (Cala et al., 2011).

4.3 Definición de las condiciones de operación

4.3.1 Estimación de las condiciones de operación de los rompedores: Teniendo en cuenta las condiciones de operación de los rompedores y eficiencia de rompimiento, se plantearon cambios en la infraestructura de los rompedores para aumentar su eficiencia y así disminuir el porcentaje de nuez entera y parcialmente rota aportado por cada uno de ellos.

4.3.2 Estimación de los parámetros de operación de las columnas: Al establecer el caudal necesario en las columnas utilizando la relación aire/mezcla triturada descrita en la Tabla 1, se

inició con la determinación de los rangos de caudal. Para esto, se obtuvo la curva de operación de cada ventilador, la cual consiste en registrar el caudal de aire y el amperaje variando las posiciones del dámper del ventilador, abarcando desde caudal mínimo hasta el caudal máximo. Con el caudal máximo dado por la columna se define la capacidad total de procesamiento de esta. Las curvas de operación se realizaron en vacío, es decir, que no se estaba procesando mezcla triturada para no causar traumatismo en la operación. Y posteriormente fueron ajustadas a condiciones de operación con carga.

A partir de los rangos de caudal dados por el ventilador, se definen los rangos de apertura del dámper en las secciones de las columnas, o zonas de separación, utilizando la Ec 8, la cual tiene en cuenta los parámetros recomendados para las velocidades de arrastre en la columna.

$$Q = v * A \quad (8)$$

Donde: Q es el caudal de aire, v es la velocidad del aire y A es el área que está definida por el movimiento de los dámpers en las zonas de separación.

4.4 Evaluación de los cambios propuestos

Después de ajustar las condiciones de operación de los equipos, se realizó un seguimiento de la eficiencia y composición a la salida de los rompedores. En las columnas de separación se determinaron las pérdidas e impurezas en los flujos de salida, y se analizó el porcentaje de extracción de PKO como se muestra en la Ec.9.

$$\% \text{ Extracción de aceite} = \frac{\text{Cantidad de aceite producido}}{\text{Cantidad de almendra procesada}} * 100\% \quad (9)$$

4.5 Diseño del esquema preliminar de control

Se planteó un esquema preliminar de control en las columnas de separación tomando como variable controlada la velocidad del flujo de aire en cada zona de separación y como variable manipulada el área de operación definida por la posición del dámper en cada zona, lo cual permite controlar la velocidad de arrastre del flujo de aire teniendo en cuenta la variación en el flujo de alimentación másico de cada columna (Wambeck, 1999).

4.6 Tareas desarrolladas durante la práctica empresarial

Tabla 3

Actividades desarrolladas durante la práctica empresarial.

FASE	ACTIVIDADES
Diagnóstico inicial	Revisión bibliográfica
	Reconocimiento de los equipos
	Diagnóstico inicial de las pérdidas e impurezas
	Medida de los flujos másicos en los rompedores y columnas
	Determinación de la distribución de tamaño
	Cálculo de las velocidades de fluidización y arrastre
	Distribución de tamaño en la entrada y salida de los rompedores
Definición de los rangos de operación	Medida de las eficiencias de rompimiento
	Medición de las condiciones iniciales
	Medición de las curvas de operación del ventilador
	Estimación parámetros de operación
Realización del esquema preliminar de control	Registro y seguimiento de los cambios propuestos
	Planteamiento esquema preliminar del sistema de control

5 Resultados

A continuación, se presentan los resultados del diagnóstico, análisis y modificaciones tanto en infraestructura como de operación de los equipos de rompimiento y separación neumática.

5.1 Rompedores de nuez

5.1.1 Reconocimiento de los rompedores. PPW cuenta con cuatro rompedores de nuez, de los cuales, tres manejan las barras con área transversal cuadradas individuales dispuestas alrededor del rompedor, como se muestra en la Figura 3. El otro rompedor posee placas dentadas que tienen el mismo funcionamiento de las barras cuadradas.

Inicialmente solo existían tres rompedores en la zona de palmistería, pero debido al aumento de caudal de operación y a la variedad del fruto procesado se hizo necesario incluir un nuevo rompedor que procesara el tamaño de nuez de 8 a 12 mm. En la tolva de alimentación del rompedor anteriormente mencionado se presenta acumulación de fibra debido a que la pendiente de caída de la tolva es muy baja, lo que ha ocasionado la corrosión de la tolva y disminución del caudal de entrada de nuez al rompedor. También se encontró que el ducto a la entrada del rompedor posee diversas variaciones de sentido de flujo, o curvas, que generan taponamientos del ducto constantemente y, por ende, disminuyen su capacidad de procesamiento. En el caso de los demás rompedores, existe la presencia de grietas en las placas laterales que permiten el escape de material particulado. Por otro lado, estas placas poseen orificios donde se sostienen las barras, los cuales se han desgastado debido al uso y a la fuerza de impacto de la nuez con las barras, impidiendo que estas permanezcan fijas y giren en su propio eje, lo cual disminuye la capacidad de procesamiento y eficiencia de los rompedores.

5.1.2 Medición de las condiciones de operación de los rompedores. En la Tabla 4 se encuentran las características principales de cada uno de los rompedores y la eficiencia de operación encontrada para cada uno de ellos durante la etapa de reconocimiento. Se observa que los rompedores 1 y 2 son los encargados de procesar entre el 60 y 70% del total de nuez alimentada, y poseen una eficiencia de rompimiento aproximada de 85% cada uno. Esta baja eficiencia se traduce en que los equipos no rompen el total de la nuez que ingresa, impidiendo que la corriente de almendra esté libre de impurezas, debido a la presencia de cáscara de las nueces que no se rompieron o quedaron parcialmente rotas. Esta presencia de impurezas conlleva a una baja extracción de aceite, disminución de la calidad de la torta de palmiste y desgaste de las prensas monotornillo.

En la Figura 7 se observa que los tamaños predominantes de la nuez entera y parcialmente rota en el flujo de almendra están entre 10 y 13 mm, los cuales corresponden a los procesados principalmente por los rompedores 1 y 2. Esto demuestra que los dos rompedores son los mayores responsables de la presencia de estas impurezas aportadas por la cáscara de la nuez en la corriente de almendra.

Tabla 4

Condiciones de operación de los rompedores

Rompedor	1	2	3	4
Tamaño de nuez procesada [mm]	9 a 12	9 a 12	13 y 14	15 a 20
Tipo de rompedor	placas dentadas		barras cuadradas	
Capacidad nominal [t/h]	4	3	3	3
Velocidad del rotor [rpm]	987	978	990	977
Fracción másica del flujo de nuez total procesada	0.37	0.36	0.17	0.10
Eficiencia de rompimiento [%]	85	84	90	90
Almendra rota [%]	9	8	8	8

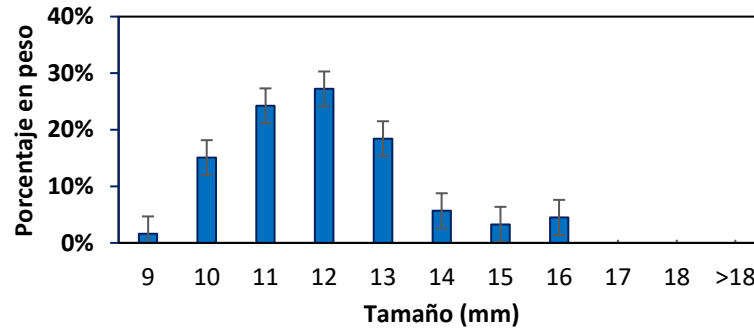


Figura 7. Distribución de tamaño de la nuez entera y parcialmente rota presente en el flujo de almendra

La eficiencia de cada rompedor depende del buen estado físico del equipo y el tamaño y humedad de la nuez que se le ingresa como alimento. Debido a esto, se obtuvieron distribuciones de tamaño del flujo de nuez entera y parcialmente rota que ingresa y sale de cada rompedor, las cuales se encuentran en las Figura 8 y Figura 9, respectivamente. En estas distribuciones se observa que el tamaño de nuez que ingresa a cada equipo corresponde a más del 70% del tamaño para el cual están configurados, ver Tabla 4, lo cual es consistente con las condiciones de operación deseadas. En las distribuciones a la salida de los rompedores se observa que entre el 60 y 80% de la nuez que no se rompió corresponde al tamaño para el cual están configurados, lo cual se debe a factores como la falta de ajuste en los equipos, desgaste de las barras cuadradas y, posiblemente, a que la nuez no circuló entre el rotor y las barras para ser rota sino entre el rotor y la pared lateral del equipo, por lo que no fue accionada contra las barras.

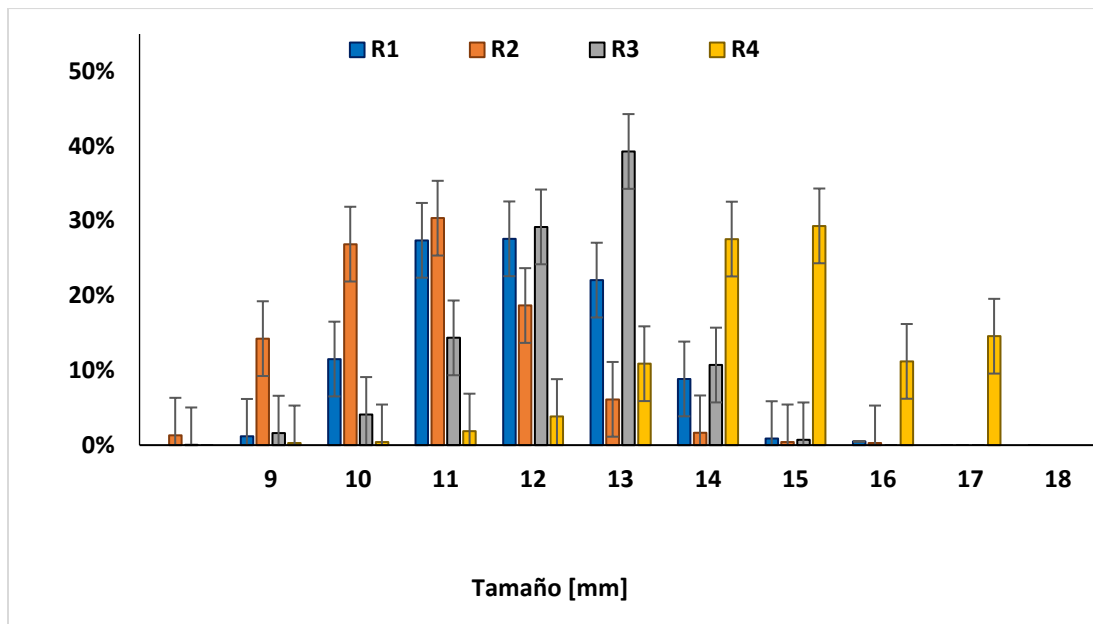


Figura 8. Distribución de tamaño de la nuez entera y parcialmente rota a la entrada de los rompedores

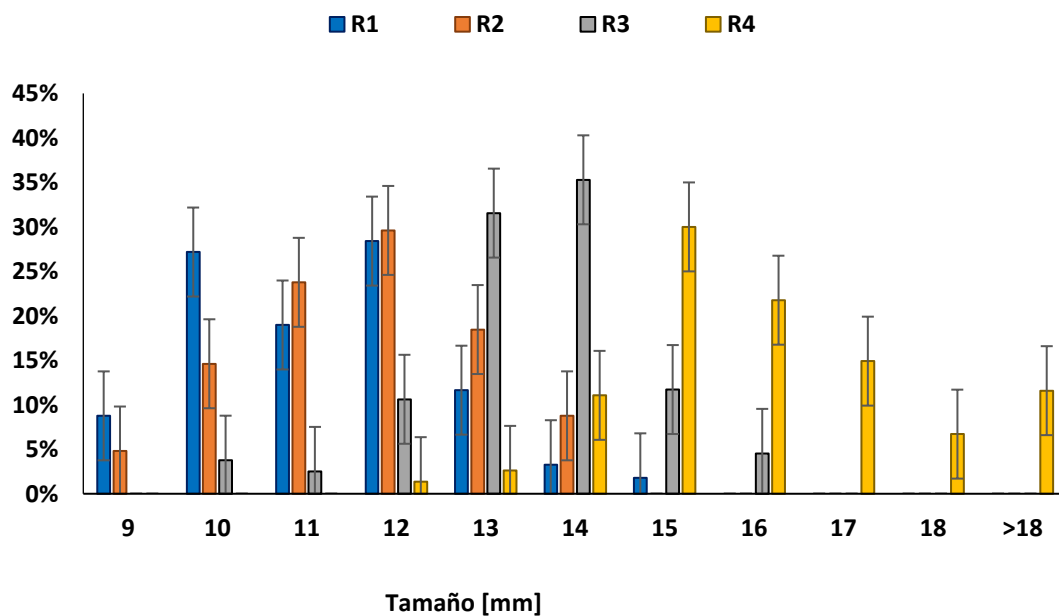


Figura 9. Distribución de tamaño de la nuez entera y parcialmente rota a la salida de los rompedores

5.1.3 Ajustes realizados en los rompedores. Para mejorar el estado físico de los rompedores se realizaron diferentes modificaciones, tales como el cambio de guías en la entrada de cada equipo, gracias a lo cual la nuez a la entrada es dirigida directamente al área entre el rotor y las barras para romper la cáscara y liberar la almendra en su interior, y no hacia los costados del equipo. También se realizaron cambios de placas laterales para los rompedores 2, 3 y 4, las cuales estaban en mal estado físico, y permitían que cáscara o almendra de menor tamaño salieran del equipo y crearan acumulación y suciedad en la zona. Además, el mal estado de las placas permitía que las barras giraran en su propio eje y se dispusieran en posición cuadrada y no rómbica como debe de ser. La Figura 10 muestra el estado inicial de los rompedores en contraste con los cambios realizados. Estos cambios permitieron el aumento de la eficiencia de 84 a 92% en el rompedor 2 y de 90 a 93% en los rompedores 3 y 4. En el caso del rompedor 1 no hubo cambio alguno en la eficiencia, debido a que este es de placas dentadas. Finalmente, se instalaron tensores en los rompedores 2, 3 y 4 para mantener fija la posición del rotor, lo cual evita el aumento de la distancia entre el rotor y las barras y, por lo tanto, mantiene la eficiencia del equipo. Lo anterior permitió la disminución de la cantidad de nuez entera y parcialmente rota en el flujo de almendra de 6.1 a 5.7% y de 19.6 a 16.6% respectivamente, disminuyendo la impureza en forma de cáscara proveniente de la nuez, como se muestra en la Figura 11. La disminución de la cantidad de nuez parcialmente rota en el flujo de almendra fue significativa para un nivel de confiabilidad del 95%, contrario a la cantidad de nuez entera, la cual no tuvo una disminución significativa. El análisis estadístico se presenta de manera detallada en el Anexo B.

Por otro lado, se planteó la modificación de la tolva a la entrada del rompedor 1, con el fin de evitar la acumulación de material particulado en su interior, ver Anexo C.

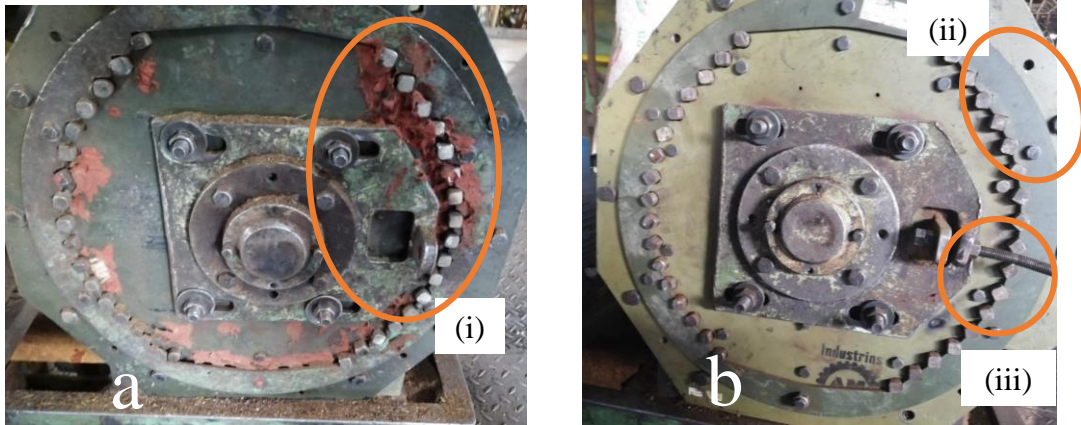


Figura 10. Vista lateral del rompedor. a) estado del equipo antes de cambios (presencia de hoyos en las placas) dónde (i) muestra los hoyos presentes en la placa lateral y las barras giradas en posición cuadrada y b) estado físico del equipo después de cambio de placas laterales. (ii) barras fijas en posición rómbica y (iii) ubicación del tensor.

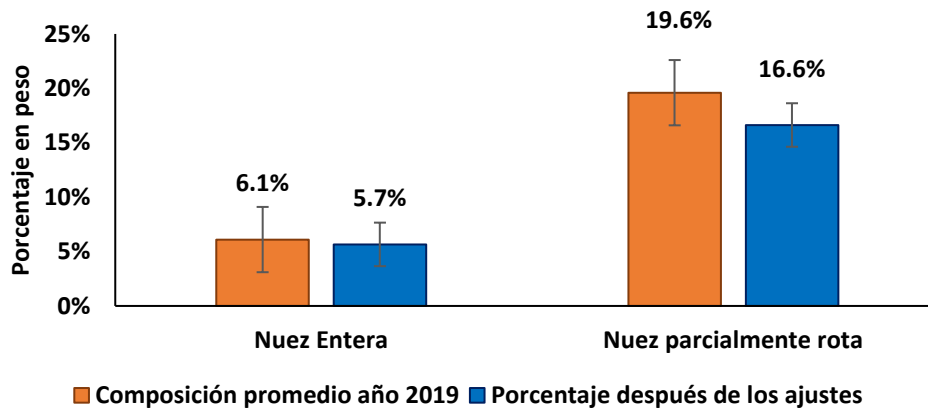


Figura 11. Composición de la nuez entera y parcialmente rota en el flujo de almendra antes y después de los cambios realizados en los rompedores

5.2 Columnas de separación neumáticas

5.2.1 Reconocimiento de las columnas. Durante el reconocimiento no se encontró desgaste y/o corrosión en el cuerpo de las columnas. En los dámpers de las zonas de separación superior se encontraron orificios de gran magnitud, generados por la fricción con el material particulado, que impedían una regulación normal de la velocidad del flujo de aire en dichas zonas.

Se observó que las pérdidas e impurezas eran controladas variando el caudal de aire en la entrada de las columnas, lo que conllevaba a la variación de las velocidades del flujo de aire en toda columna. Es decir, que al tratar de controlar las pérdidas de almendra en la salida superior de las columnas disminuyendo el caudal de aire, disminuía también la velocidad en la zona inferior, por lo cual aumentaban las impurezas. Del mismo modo, al tratar de disminuir las impurezas aumentando el caudal de aire, aumentaba la velocidad en la zona superior y, por lo tanto, también las pérdidas de almendra.

La segunda columna posee dos zonas de separación y una salida intermedia que inicialmente descargaba parte de la mezcla triturada en hidrociclones. Luego, el sistema de hidrociclones fue retirado y la salida intermedia fue sellada. Esto conlleva a que la segunda zona de separación no sea utilizada para la operación, y únicamente sea parte del cuerpo de la columna. Este hecho genera que el funcionamiento de las dos columnas sea diferente. En el caso de la primera columna la velocidad del aire en la zona superior debe ser menor que en la zona inferior para que el material que fue arrastrado en la primera zona, y no fue arrastrado en la segunda, sea el que salga por la salida intermedia. En la segunda columna la velocidad del aire en la zona superior debe ser mayor o igual que en la zona inferior para que el material fluidizado por el aire sea arrastrado hacia su disposición final y no se presente una caída del lecho.

5.2.2 Medición de las condiciones de operación en las columnas de separación. En la Tabla 5 se presentan los flujos y composición másica promedio trabajados en las columnas (detallados en el Anexo D), donde el flujo másico medido en la parte inferior de la primera columna es de 1.8 t/h y posee una composición másica de cáscara de 9%, y en la segunda columna es 0.8 t/h con 16% de cáscara, siendo la primera columna la que aporta más del 50% sobre el total de la cáscara suelta presente en el flujo de almendra a la salida de las columnas. Inicialmente se determinó la distribución de tamaño de la nuez entera, nuez parcialmente rota, almendra entera, almendra rota y cáscara suelta en la entrada y salida de cada columna (Anexo E), con el fin de hallar las velocidades de fluidización y arrastre teóricas de cada componente manejado en las columnas. En el Anexo F se encuentran las velocidades de fluidización y arrastre teórica en conjunto con la velocidad experimental recomendada por Cenipalma (Cala A, 2006). En la distribución de tamaño realizada se encontró que los tamaños predominantes de la cáscara en la salida inferior de las dos columnas son de 7.14 y 11 mm, ambos con una velocidad de arrastre de alrededor de 9 m/s, por lo que las velocidades en las zonas inferiores para ambas columnas deben ser mayor a 9 m/s para arrastrar estos tamaños de cáscara. Se determinó que en la zona de palmistería se procesan 4.5 t/h de nuez, y a la salida de las columnas se producen 2.8 t/h de almendra con 18.5% de impureza, es decir, que del total de flujo producido 0.5 t/h son de cáscara.

Tabla 5

Flujo máscicos y composiciones en las columnas de separación neumáticas

	Salida inferior de ambas columnas	Salida inferior primera columna	Salida inferior segunda columna	Salida superior primera columna	Salida superior segunda columna
Flujo máscico promedio [kg/h]	2876.54	1882.76	836.61	1237.33	426.7
Fracción máscica promedio					
Nuez entera	0.06	0.06	0.05	0	0
Nuez parcialmente rota	0.17	0.22	0.17	0	0
Almendra Entera	0.54	0.6	0.35	0	0
Almendra rota	0.12	0.03	0.29	0.05	0.08
Cáscara suelta	0.12	0.09	0.16	0.95	0.92

En la Tabla 6 se observa la relación kg aire/kg mezcla triturada para cada una de las columnas. En la primera la relación es de 2.5, la cual está por debajo de lo recomendado por Cenipalma, Tabla 1. Por otro lado, la segunda columna opera con una relación de 4.9, encontrándose en el rango recomendado.

Tabla 6

Relación kg de aire/kg mezcla triturada

	Primera Columna	Segunda Columna	Valor recomendado por Cenipalma
Flujo de masa promedio [kg/h]	4383.4	1263.31	-
Caudal de aire [m³/h]	9558.65	5407.56	-
Relación kg aire/kg mezcla triturada	2.5	4.9	4 a 6

5.2.3 Caracterización del caudal de aire en las columnas. Para definir los ajustes en la operación en las columnas se obtuvieron inicialmente las curvas de operación de los ventiladores, las cuales se observan en las Figura 12 y Figura 13. Se encontró que el caudal máximo de aire dado por la primera columna es de aproximadamente $12000 \text{ m}^3/\text{h}$ y, teniendo en cuenta la menor relación de $4 \text{ kg aire/kg mezcla triturada}$, se calcula el flujo másico máximo que en teoría podría trabajar la columna el cual es de 3.3 t/h menor al flujo másico de 4.8 t/h que actualmente se procesa. Por lo que se recomienda aumentar la cantidad de aire que se le ingresa a la columna si se desea trabajar con los valores recomendados, aunque experimentalmente esto no implica que no es posible trabajar flujos másicos mayores. La segunda columna actualmente maneja un flujo de 1.2 t/h , y se encontró que el caudal máximo de aire es de alrededor de $10000 \text{ m}^3/\text{h}$, pudiendo manejar un flujo másico máximo teórico de 2.7 t/h calculado usando una relación de aire/ mezcla triturada de 4.

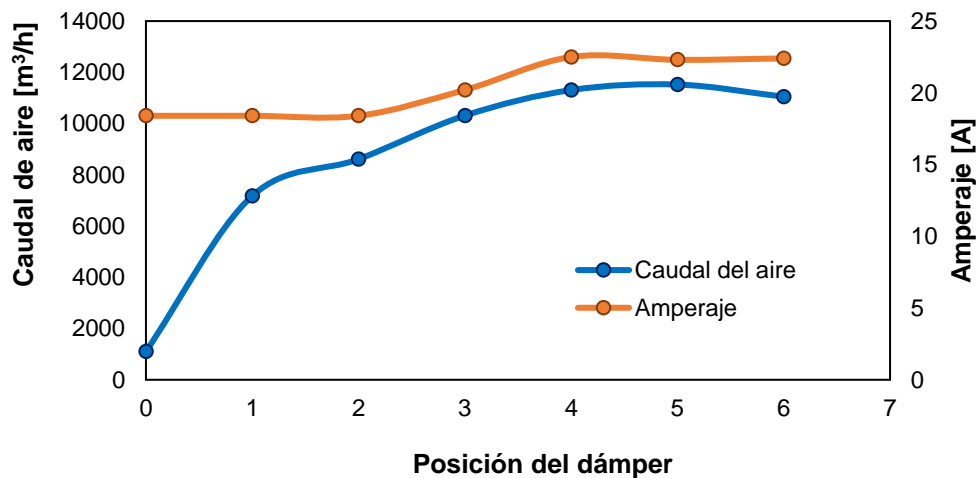


Figura 12. Curva de operación del ventilador de la primera columna.

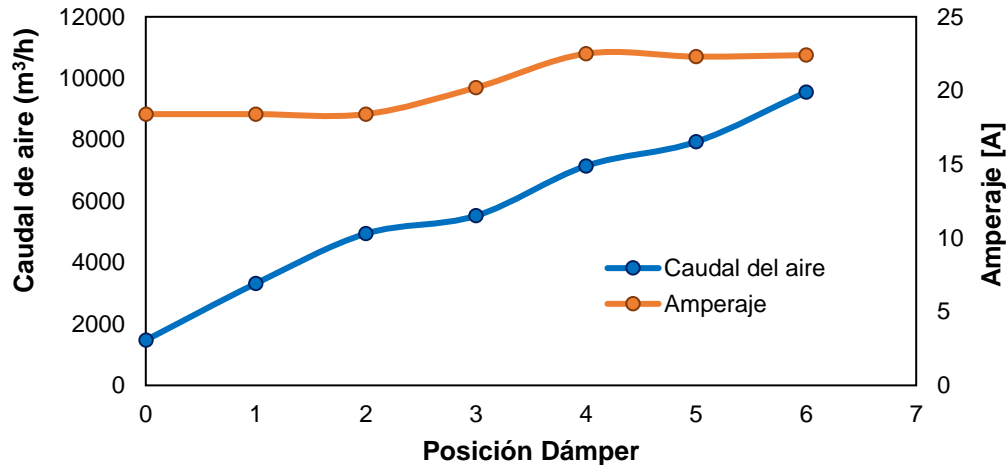


Figura 13. Curva de operación del ventilador de la segunda columna.

5.3 Ajustes realizados en las columnas

En la separación neumática la variable clave es la velocidad del aire en cada zona, por ello se tuvieron en cuenta las curvas de operación de los ventiladores mostrados en las Figura 12 y Figura 13, las velocidades teóricas recomendadas para cada zona, las velocidades de arrastre teóricas y experimentales, mostrada en el Anexo F, y la relación de la velocidad de aire y el área por donde circula para realizar los ajustes. En la Tabla 7 se muestra las variaciones de área en cada zona de separación y en la Figura 14 se observan los cambios realizados con respecto a la velocidad del aire en cada una de estas zonas. Es de aclarar que estos valores están dados cuando la columna está en vacío. En la zona inferior de la primera columna, la cual controla las impurezas, se aumentó la velocidad del aire de 16.7 a 20.58 m/s y en la zona superior se disminuyó la velocidad de 11.4 a 10.3 m/s, esto con el fin de disminuir las pérdidas de almendra en el flujo en la salida superior. Para la segunda columna la velocidad del aire aumentó de 10.5 a 11.2 m/s.

Tabla 7

Ajustes realizados en las zonas de separación

		Primera zona de separación		Segunda zona de separación	
Área total [m ²]		0.367		0.548	
Primera columna	Área operación (antes) [m ²]	0.151	41% del área total	0.347	63% del área total
	Área operación (después) [m ²]	0.163	44% del área total	0.305	56% del área total
Área total [m ²]		0.318		0.386	
Segunda columna	Área operación (antes) [m ²]	0.142	45% del área total	0.078	20% del área total
	Área operación (después) [m ²]	0.151	48% del área total	0.139	36% del área total

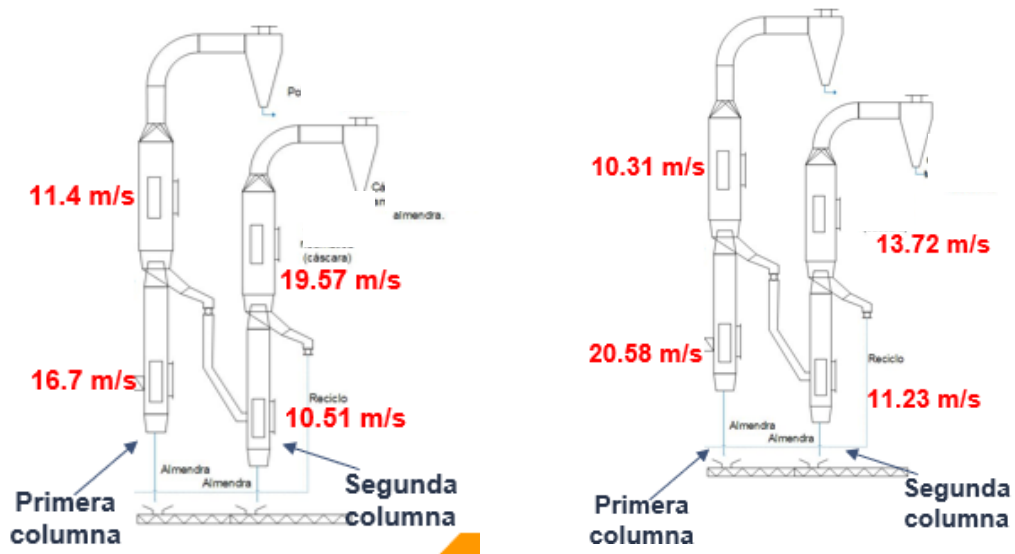


Figura 14. Condiciones de operación de las columnas. a) Valores de la velocidad del aire antes de realizar los ajustes. b) Valores de la velocidad del aire después de realizar los ajustes.

Los cambios realizados permitieron disminuir la cantidad de cáscara suelta en las salidas inferiores de las columnas y esto conllevó a aumentar la eficiencia con que el aire en las columnas extrae la cáscara suelta de 84.7 a 90.5%. En la Figura 15 se observa la composición porcentual en el flujo de almendra, donde se refleja los ajustes hechos tanto en los rompedores como en las

columnas, permitieron la disminución significativa de cáscara suelta y nuez parcialmente rota (según un nivel de confiabilidad de 95%, ver Anexo B). La cantidad de cáscara suelta disminuyó de 8.7 a 5.7%, y la cantidad de nuez parcialmente rota disminuyó de 19.6 a 16.6%.

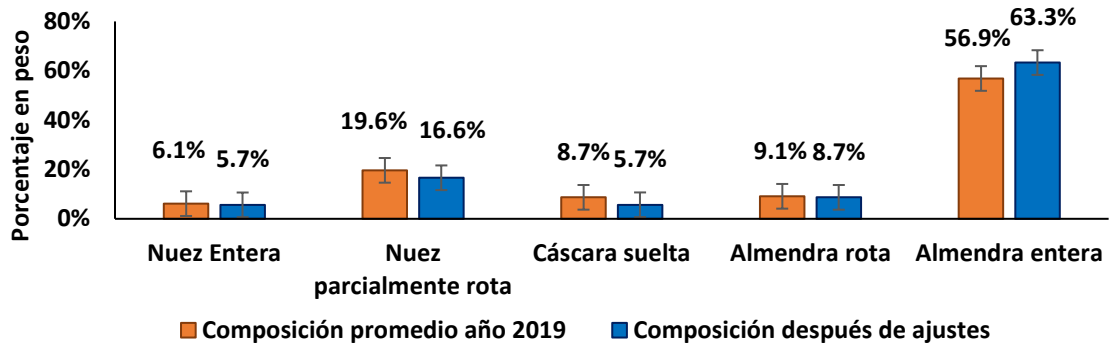


Figura 15. Composición másica del flujo de almendra antes de después de los ajustes realizados

En la Figura 16 se observa que las impurezas totales o cantidad de cáscara suelta, cáscara contenida en nuez entera y en la nuez parcialmente rota, disminuyeron de 18.5 a 14.6%, comparadas con el promedio del año 2019. No hubo una disminución significativa en las pérdidas de almendra (para un nivel de confiabilidad del 95%, ver Anexo B), las cuales se mantuvieron en alrededor de 6% para ambas columnas.

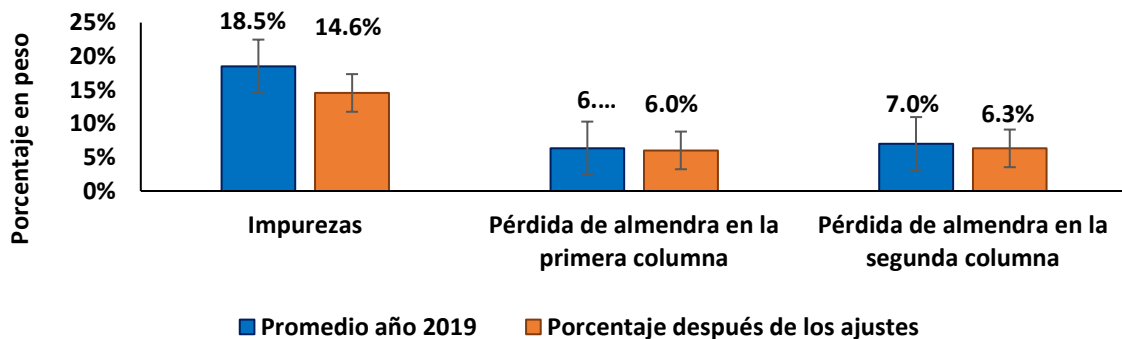


Figura 16. Porcentaje de impurezas y pérdidas de almendra en la primera y segunda columna

La disminución de las impurezas permitió aumentar el porcentaje de extracción de aceite de palmiste de 35% para el año 2019 a 38%. Además, disminuyó la cantidad de cáscara en la torta de palmiste, por lo que aumentó la calidad de esta. Las mejoras realizadas permitieron disminuir la cantidad de cáscara en el flujo de almendra de 0.5 t/h a 0.4 t/h, lo que redujo el volumen ocupado por la cáscara en los silos de secado y aumentó la cantidad de almendra presente en los silos, además también fue posible aumentar el flujo másico de nuez procesado de 4.8 a 5.9 t/h sin repercutir en la calidad de la almendra.

Como aporte adicional se creó un instructivo de manejo de las columnas para los operarios de la planta (ANEXO G), debido a que la presencia de impurezas se debe a la incorrecta configuración de las columnas por parte de los operadores.

5.4 Esquema preliminar del sistema de control

Con el fin de monitorear las condiciones de operación al interior de las columnas, mantener y mejorar la eficiencia tanto de la extracción de la cáscara como de la almendra, se propone el esquema preliminar de un sistema de control en las columnas de separación neumática. En la Figura 17 se presenta el sistema propuesto, el cual consiste en un sensor de flujo de aire instalado en cada zona de separación en conjunto con un controlador tipo PLC y un actuador neumático que permite variar el área de paso del aire en las zonas de separación mediante el movimiento del dámper en cada zona. El sistema de control servirá para mantener constante la velocidad del aire en la zona de separación teniendo en cuenta el set point definido para la misma, y con ello conservar la calidad en el proceso evitando errores operacionales.

El sistema tendrá en cuenta perturbaciones como la variación de flujo de mezcla triturada en la entrada de las columnas, el taponamiento de los ductos al interior de estas, y las fugas de aire en el cuerpo de la columna por corrosión o desgaste.

El funcionamiento del sistema de control será básico, el sensor medirá el caudal de aire y lo comparará con el valor de referencia o set point. Dependiendo de la diferencia entre la medida y el set point, el actuador o elemento final de control, en este caso la pared móvil de la zona aumentará o disminuirá el área de paso para regular la velocidad en su interior, y por lo tanto mantener una buena eficiencia en el proceso de separación.

De igual modo, el sistema de control servirá para conocer el estado de los ventiladores de cada columna, por lo que se podrá prever el desbalanceo en los ventiladores, que causa recalentamiento en las chumaceras del eje y puede tender a afectar el motor de este.

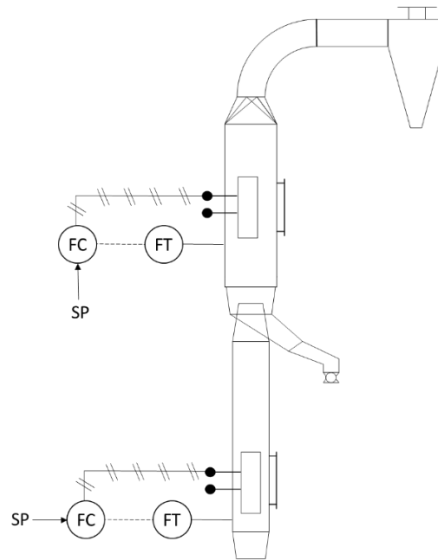


Figura 17. Esquema preliminar del sistema de control

6 Conclusiones

El desarrollo del proyecto permitió realizar mejoras tanto estructurales, como de operación en los rompedores y las columnas de separación neumáticas usadas en la zona de palmistería. Los ajustes realizados permitieron disminuir las impurezas en el flujo de almendra y, por ende, mejorar el porcentaje de extracción de aceite de palmiste, lo cual genera un beneficio económico para la empresa. Por otro lado, también se mejoró la calidad de la torta de palmiste producida y se pudo aumentar la capacidad de producción de la zona.

Además, se propuso un sistema preliminar de control que permitirá eliminar los errores operacionales al automatizar el proceso, mejorando así el desarrollo del proceso.

7. Recomendaciones

Se recomienda optimizar el proceso de secado en el silo de nuez, debido a que la nuez que ingresa entra con una humedad de 19% y sale con una humedad de alrededor de 17%, lo cual influye en la eficiencia de rompimiento. Además, se recomienda modificar la configuración del primer rompedor de placas dentadas a barras cuadradas.

En el caso de los rompedores se recomienda hacer un seguimiento de los cambios realizados en ellos, como cambio de barras cuadradas, cambio de rotor, cambio de placas laterales para mantener la eficiencia de los equipos mayor a 90%. En el caso de las columnas, se recomienda hacer un seguimiento de los dámpers o pared móvil que se encuentran en su interior para evitar desgaste en las láminas, además se recomienda realizar limpieza interna de los ductos para evitar taponamientos que pueden influir en la variación de la velocidad del aire en su interior y por lo tanto causar traumatismo en el proceso.

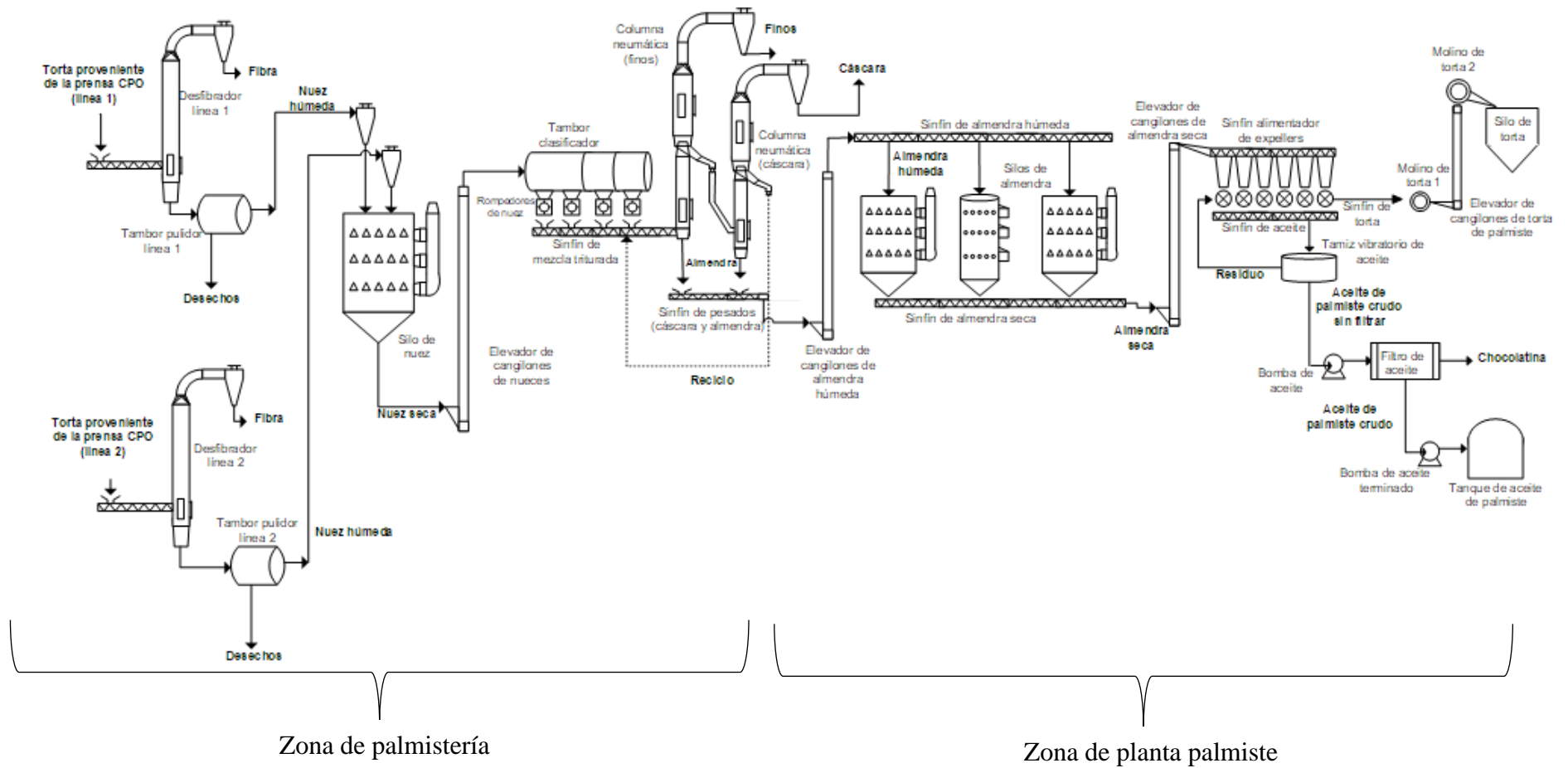
Bibliografía

- A, I. A. V. M. S. (n.d.). Catálogo Ripple Mill. Retrieved from <https://es.scribd.com/document/242454969/CATALOGO-RIPPLE-MILL-doc>
- Alberto, W., Lara, A., Laboratorio, J. D. E., Luis, I. N. G., & Ávila, M. D. E. (n.d.). *Influencia del contenido de cuezco sobre el residual de aceite de palmiste en la torta de palmiste*.
- Cala A, S. L. (2006). *Análisis de la operación de separación fibra – nuez en columna neumática apoyado en evaluaciones realizadas a escala piloto*. Universidad Industrial de Santander.
- Cala A, S. L., Yáñez Angarita, E. E., & García Núñez, J. A. (2011). *Recuperación de almendra: Sintonización de columnas de separación neumáticas en plantas de beneficio*.
- Cala, S., Yáñez, E., & García, J. A. (2011). *Manual de procedimientos de laboratorio en plantas de beneficio*. Bogotá: CENIPALMA.
- Case, F. (2010). *Implementación de buenas prácticas operativas : caso Frupalma Implementation of Best Operating Practices : Introducción Metodología*. 31(4), 74–83.
- Gaitán, G. C., & Castillo, G. B. (n.d.). *Procesos modernos de extracción de aceite de palma*.
- Garcés, I. C., & Sánchez, M. C. (1997). *Productos derivados de la industria de la palma de aceite. Usos I*. (1), 33–48.
- Geankoplis, C. J. (1998). *Procesos de transporte y operaciones unitarias* (Tercera ed). COMPAÑÍA EDITORIAL CONTINENTAL, S.A. DE C.V. MÉXICO.
- Halim, R. M., Ramli, R., Rahmat, C., Mat, C., & May, C. Y. (2016). *Dry Separation of Palm Kernel and Palm Shell Using a Novel Five-Stage Wining Column System*. (April). <https://doi.org/10.3390/technologies4020013>
- Hamblin, F. K., Amiento, F., La, O. D. E., Sobre, D. E. I., & Operacion, L. A. (1991). *Extracción de aceite de palma y nuevos criterios de procesamiento*. 12.
- Institiut Penyelidikan Minyak. Mongana report (translation)*. (n.d.). 2.
- Leon, A. Y. (2004). Evaluación técnica y económica de pérdidas de almendra en las columnas de separación neumática del proceso de palmistería en las plantas extractoras de aceite de palma africana en la Zona Central. *Tesis*, 1–123.
- Mathews, J., Lee, A. K., & Rao, S. (2004). *Contenido de aceite en el racimo y mesocarpio del fruto de la palma de aceite , y algunos de sus factores fisiológicos y agronómicos * Oil Content in Oil Palm Fruit Mesocarp and Bunch , and Some of its Related Physiological and Agronomical Factors*. 25(4), 11–29.
- McCabe, W. L., Smith, J. C., & Harriot, P. (2007). *Operaciones unitarias en Ingeniería Química* (Séptima ed). McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. de C.V.
- Menon, N. R. (n.d.-a). *Mongana Basics : Part 21 – The Separation of Fibre from Nuts ***. (94), 49–65.
- Menon, N. R. (n.d.-b). *Mongana Basics : Part 22 – Separation of the Cracked Mixture ***. 33–41.
- Mesa, G. R. (n.d.). *Variaciones tecnológicas en el diseño de trituradores " ripple mill "*

- Technological modifications in the ripple mill design.* 352–356.
- Montgomery, D. C. (n.d.). *Design and analysis of experiments* (5th ed.).
- Pantzaris, T. P., Jaaffarahmad, M., Origen, E. L., & Aceite, D. E. L. (2002). *Propiedades y usos del aceite de palmiste Properties and Utilization of Palm Kernel Oil.* 2(35), 11–23.
- Rubiano, G. (1998). Mejoramiento en la extracción de aceite de palmiste. *PALMAS*, 19(1), 299–304.
- Series, I. O. P. C., & Science, M. (2018). *Selection of Optimal Factor Level From Process Parameters in Palm Oil Industry Selection of Optimal Factor Level From Process Parameters in Palm Oil Industry.* <https://doi.org/10.1088/1757-899X/288/1/012056>
- Suárez, Q. D., Yáñez, E., García, J. A., Cárdenas, S., Granados, J. F., & Bustillo, L. (2000). Evaluación del proceso de recuperación de almendra. *Revista PalmasPalmas*, 21, 357–365.
- Ura. (n.d.). Fruto de la palma de aceite. Retrieved from <https://ura.farm/fertilizacion-palma-de-aceite/palm-oil-fruit/>
- Wambeck, N. (1999). *Oil Palm Process Synopsis. I*, 1–737.
- Zone, E. (n.d.). *Reducción de pérdida de almendra en tres plantas de la Zona Oriental Reduction of the Loss of Kernel in Three Plants in the Eastern Zone.* 438–442.

Anexos

Anexo A. Diagrama de la zona de palmistería en la empresa Palmeras de Puerto Wilches S.A.



Anexo B. Análisis estadístico de los cambios realizados en los rompedores y las columnas neumáticas

Para analizar si los cambios realizados sobre las columnas y los rompedores fueron significativos se llevó a cabo una prueba de hipótesis (Montgomery, n.d.). Se plantearon las siguientes hipótesis nula y alternativa para todos los casos:

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

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

Debido a que se desconocen las varianzas se usó el t_v para el desarrollo de la prueba de hipótesis. Para los casos donde se puede suponer que las varianzas de las dos muestras son iguales, el estadístico está definido por la ecuación B1, donde S_p es una varianza ponderada, \bar{y} es el promedio de los datos, S^2 es la varianza muestral y n es el número de datos de la muestra. En este primer caso los grados de libertad del estadístico están definidos por la ecuación B2.

$$t_v = \frac{(\bar{y}_{\text{antes del cambio}} - \bar{y}_{\text{después del cambio}})}{S_p \sqrt{\frac{1}{n_{\text{antes del cambio}}} + \frac{1}{n_{\text{después del cambio}}}}} \quad (\text{Ec. B1})$$

$$S_p = \sqrt{\frac{(n_{\text{antes del cambio}} - 1)S_{\text{antes del cambio}}^2 + (n_{\text{después del cambio}} - 1)S_{\text{después del cambio}}^2}{n_{\text{antes del cambio}} + n_{\text{después del cambio}} - 2}}$$

$$v = n_{\text{antes del cambio}} + n_{\text{después del cambio}} - 2 \quad (\text{Ec. B2})$$

Cuando las varianzas no pueden suponerse iguales el estadístico t_v se define como se muestra en la Ecuación B3, y los grados de libertad son definidos por la Ecuación B4.

$$t_v = \frac{(\bar{y}_{\text{antes del cambio}} - \bar{y}_{\text{después del cambio}})}{\sqrt{\frac{S_{\text{antes del cambio}}^2}{n_{\text{antes del cambio}}} + \frac{S_{\text{después del cambio}}^2}{n_{\text{después del cambio}}}}} \quad (\text{Ec. B3})$$

$$v = \frac{\left(\frac{S_{\text{antes del cambio}}^2}{n_{\text{antes del cambio}}} + \frac{S_{\text{después del cambio}}^2}{n_{\text{después del cambio}}}\right)^2}{\frac{\left(\frac{S_{\text{antes del cambio}}^2}{n_{\text{antes del cambio}}}\right)^2}{n_{\text{antes del cambio}} - 1} + \frac{\left(\frac{S_{\text{después del cambio}}^2}{n_{\text{después del cambio}}}\right)^2}{n_{\text{después del cambio}} - 1}} \quad (\text{Ec. B4})$$

Análisis del cambio de cada uno de los componentes en el flujo de almendra

Inicialmente se realizaron los supuestos de normalidad para cada uno de los componentes del flujo de almendra (nuez entera, nuez parcialmente rota, cáscara suelta, almendra rota y almendra entera), con el fin de determinar si las varianzas pueden suponerse iguales, ver Figuras B1-B5.

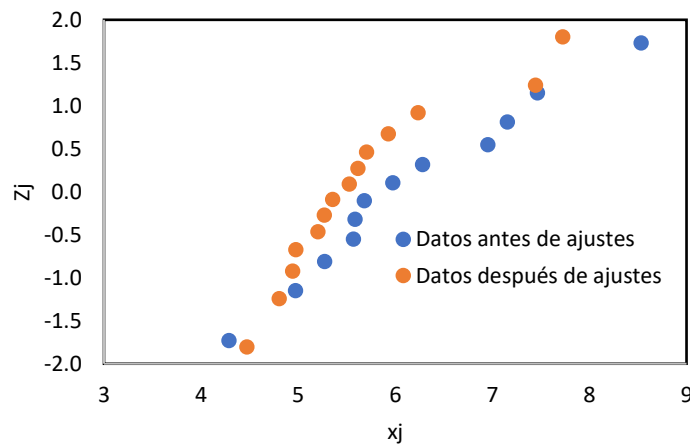


Figura B1. Supuesto de normalidad para el porcentaje de nuez entera en el flujo de almendra

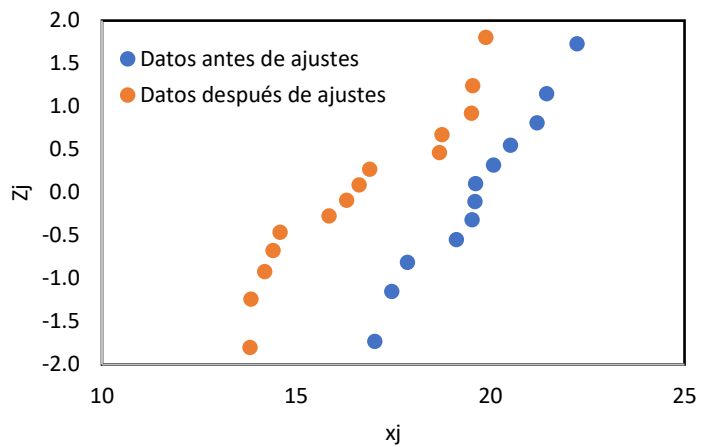


Figura B2. Supuesto de normalidad para el porcentaje de nuez parcialmente rota en el flujo de almendra

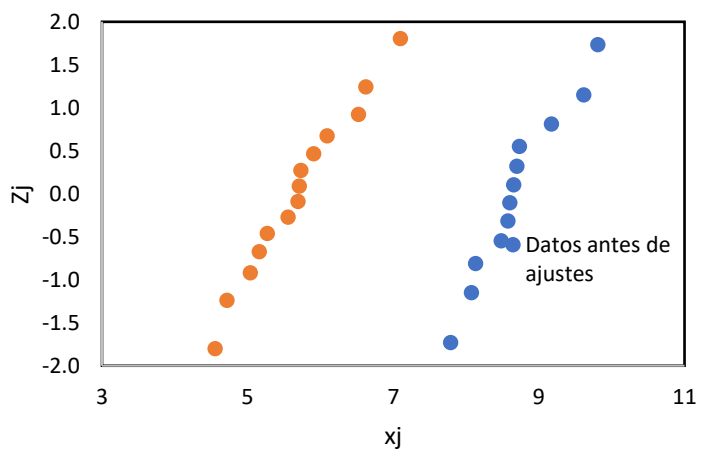


Figura B3. Supuesto de normalidad para el porcentaje de cáscara suelta en el flujo de almendra

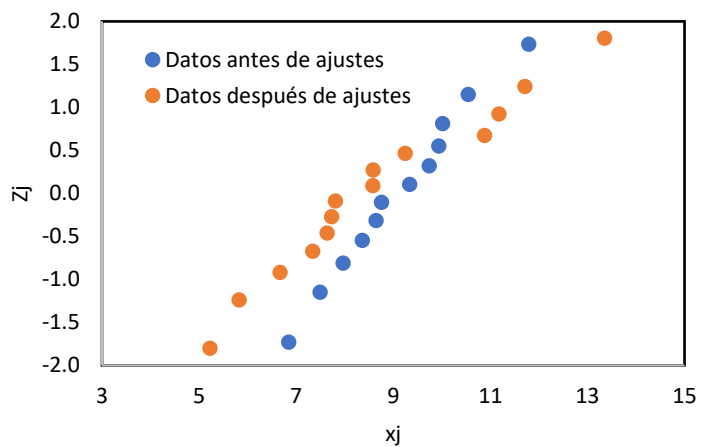


Figura B4. Supuesto de normalidad para el porcentaje de almendra rota en el flujo de almendra

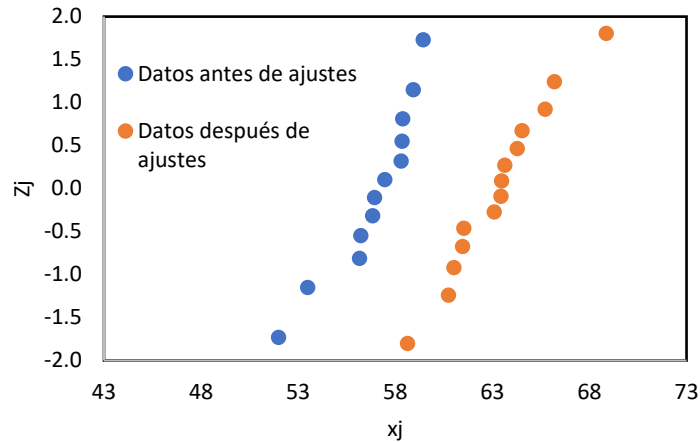


Figura B5. Supuesto de normalidad para el porcentaje de almendra entera en el flujo de almendra

En las Figuras B1 y B5 se puede observar que las líneas se cruzan, lo cual indica que tanto en el caso de la nuez entera como de la almendra rota no se puede asumir que las varianzas son iguales, contrario a los demás casos. También se pudo observar que a modo general los datos cumplen el supuesto de normalidad, debido a que siguen el comportamiento de línea recta.

Teniendo en cuenta los supuestos de normalidad se determinó el procedimiento para hallar el estadístico t_v en cada caso. Una vez obtenido el estadístico se comparó su valor absoluto con el estadístico t de Student $(t_{\frac{\alpha}{2},v})$. En el caso en que $|t_v| > t_{\frac{\alpha}{2},v}$ se puede rechazar la hipótesis nula (H_0), lo cual indica que si existe una diferencia significativa. Para el análisis se tomó una confiabilidad del 95% ($\alpha = 0.05$), y los resultados se resumen en la tabla B1.

Tabla B1.

Análisis de hipótesis para el cambio de cada uno de los componentes del flujo de almendra

	Nuez Entera	Nuez parcialmente rota	Cáscara suelta	Almendra rota	Almendra entera
$\bar{y}_{después\ del\ cambio}$	5.7	16.6	5.7	8.7	63.3
$\bar{y}_{antes\ del\ cambio}$	6.1	19.6	8.7	9.1	56.9
$S^2_{después\ del\ cambio}$	0.9	5.2	0.5	5.5	6.8
$S^2_{antes\ del\ cambio}$	1.4	2.6	0.4	1.9	4.9
$n_{después\ del\ cambio}$	14	14	14	14	14
$n_{antes\ del\ cambio}$	12	12	12	12	12
S_p^2	-	4.0	0.5	-	5.9
S_p	-	2.0	0.7	-	2.4
ν	21	24	24	22	24
t_ν	-1.1	-3.8	-11.4	-0.6	6.7
$ t_\nu $	1.1	3.8	11.4	0.6	6.7
$t_{\frac{\alpha}{2}, \nu}$	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
	No hay efecto	Si hay efecto	Si hay efecto	No hay efecto	Si hay efecto

Análisis del cambio en el porcentaje de impurezas y el porcentaje de pérdidas en cada columna

Siguiendo el procedimiento descrito anteriormente, se comprobaron los supuestos de normalidad para el porcentaje de impurezas y para los porcentajes de pérdida en cada columna antes y después de los ajustes realizados, ver figuras B6-B8.

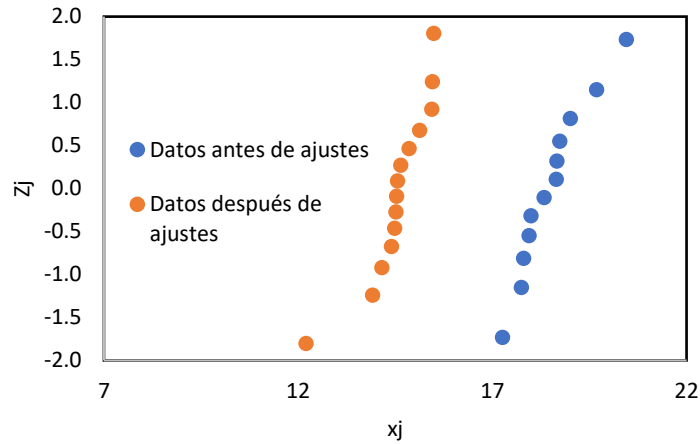


Figura B6. Supuesto de normalidad para el porcentaje de impureza en el flujo de almendra

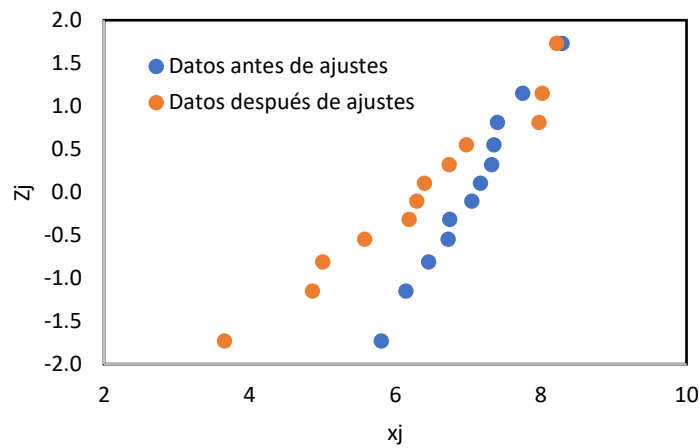


Figura B7. Supuesto de normalidad para el porcentaje de pérdida de almendra en la segunda columna

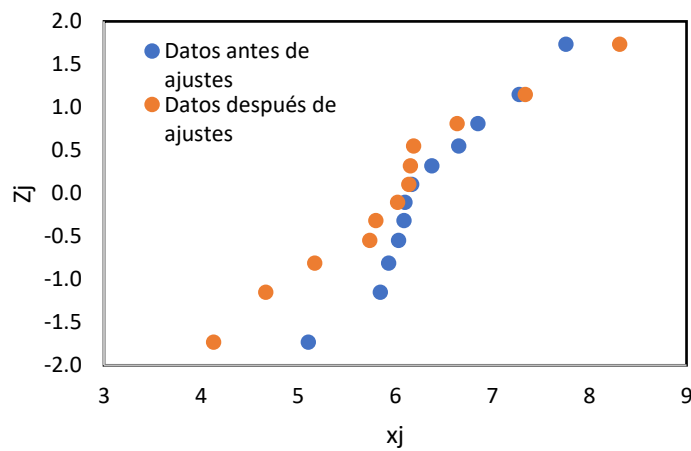


Figura B8. Supuesto de normalidad para el porcentaje de pérdida de almendra en la primera columna

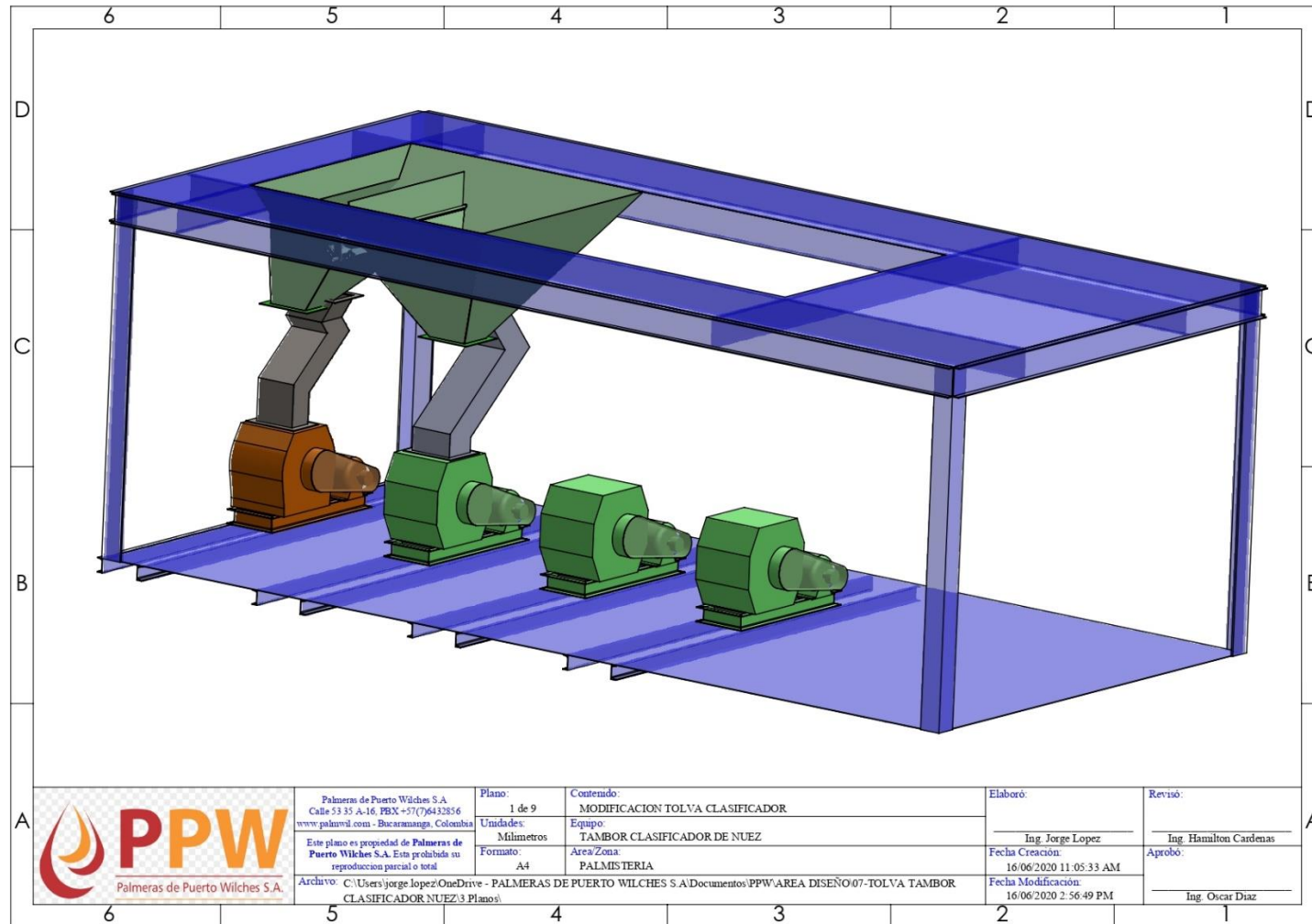
En la Figura B6 se puede observar que las líneas no se cruzan, lo cual indica que en el caso del porcentaje de pérdida se puede asumir que las varianzas son iguales, contrario a los demás casos. También se pudo observar que a modo general los datos cumplen el supuesto de normalidad, debido a que siguen el comportamiento de línea recta. En este caso se usó nuevamente una confiabilidad del 95% para comprobar los supuestos. Los resultados se muestran en la tabla B2.

Tabla B2

Análisis de hipótesis para el cambio de las impurezas en el flujo de almendra y el porcentaje de pérdidas en cada una de las columnas

	% Impurezas	% Pérdidas de almendra en la segunda columna	% Pérdidas de almendra en la primera columna
$\bar{y}_{después\ del\ cambio}$	14.6	6.3	6.0
$\bar{y}_{antes\ del\ cambio}$	18.5	7.0	6.3
$S^2_{después\ del\ cambio}$	0.7	1.9	1.2
$S^2_{antes\ del\ cambio}$	0.8	0.5	0.5
$n_{después\ del\ cambio}$	14	12	12
$n_{antes\ del\ cambio}$	12	12	12
S_p^2	0.7	-	-
S_p	0.9	-	-
v	24	16	18
t_v	11.7	1.5	0.9
$ t_v $	11.7	1.5	0.9
$t_{\frac{\alpha}{2},v}$	2.1	2.1	2.1
	Si hay efecto	No hay efecto	No hay efecto

Anexo C. Modificación propuesta para la tolva de retención de nuez a la entrada del rompedor 1.



B.TOLVA NUEVA

LISTA DE MATERIALES
CANTIDAD: 1 UND

N.º	N.º DE PIEZA	CANT.
1	B.1.LAMINA-1	1
2	B.2.LAMINA-2	1
3	B.3.LAMINA-3	1
4	B.4.LAMINA-4	1
5	B.5.LAMINA-5	1
6	B.6.LAMINA-6	1
7	B.7.LAMINA-7	1
8	B.8.BRIDA-1	1
9	B.9.BRIDA-2	1
10	B.10.EJE-1	1
11	B.11.TUBO-1	1
12	B.12.LAMINA-8	1
13	B.13.LAMINA-9	1
14	B.14.TUBO-2	1
15	B.16.POSICIONADOR	1

DETALLE A
ESCALA 1 : 10

<p>Palmeras de Puerto Wilches S.A.</p>	Palmeras de Puerto Wilches S.A. Calle 53 35 A-16, PBX +57(7)6432856 www.palmvil.com - Bucaramanga, Colombia	Plano: 2 de 9	Contenido: MODIFICACION TOLVA CLASIFICADOR	Elaboró: Ing. Jorge Lopez	Revisó: Ing. Hamilton Cardenas	
	Este plano es propiedad de Palmeras de Puerto Wilches S.A. Esta prohibida su reproducción parcial o total	Unidades: Milímetros	Equipo: TAMBOR CLASIFICADOR DE NUEZ	Fecha Creación: 16/06/2020 11:05:33 AM	Aprobó: Ing. Oscar Diaz	
	Archivo: C:\Users\jorge.lopez\OneDrive - PALMERAS DE PUERTO WILCHES S.A\Documentos\PPW\AREA DISEÑO\07-TOLVA TAMBOR CLASIFICADOR NUEZ\3 Planos\	Formato: A4	Area/Zona: PALMISTERIA	Fecha Modificación: 16/06/2020 2:56:49 PM		

Anexo D. Caracterización de los flujos máscicos de la zona de palmistería para el año 2019.

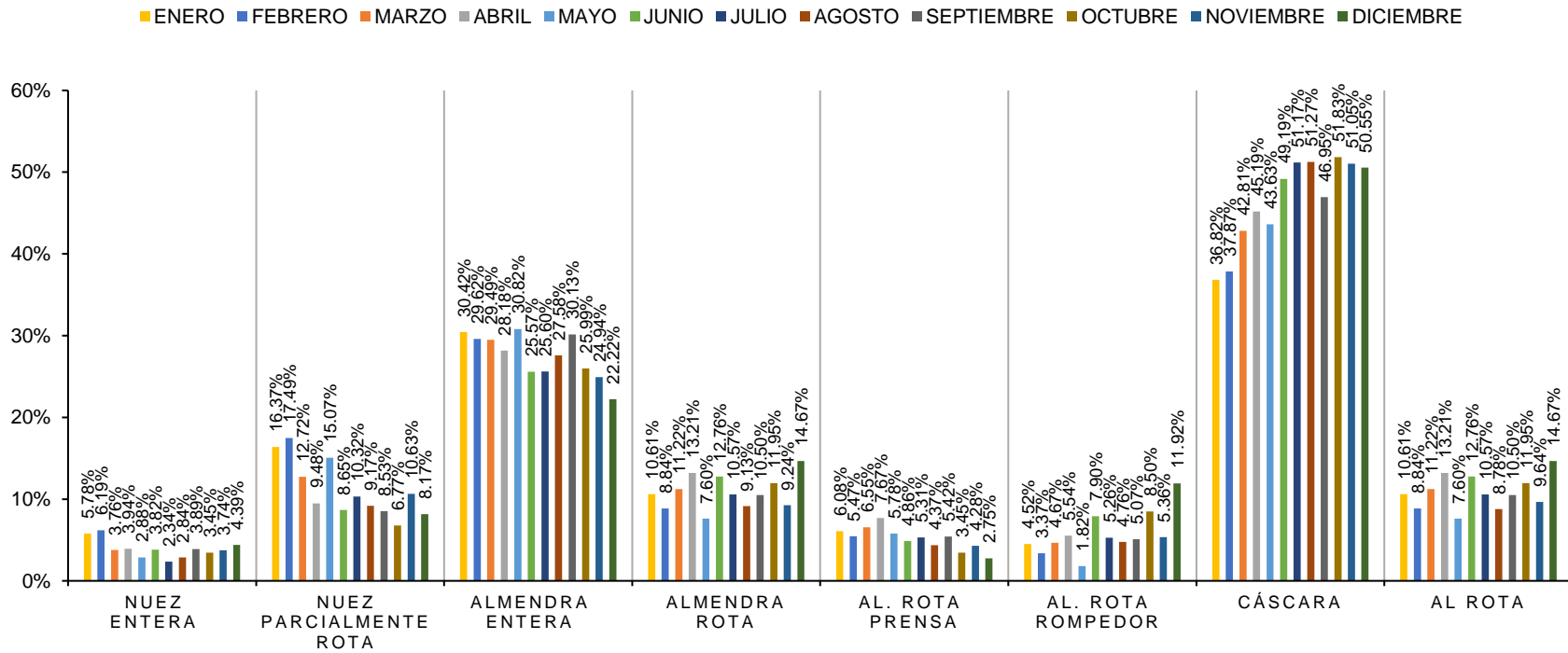


Figura D1. Composición máscica del flujo de salida del rompedor uno en el año 2019

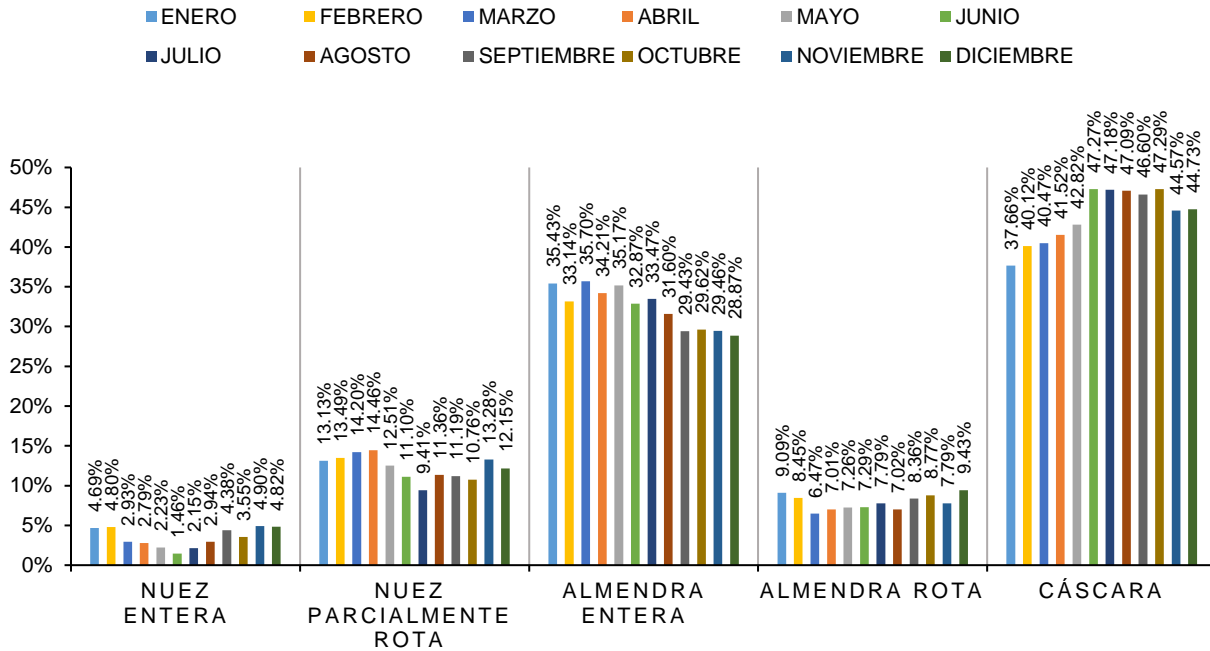


Figura D2. Composición másica del flujo de salida del rompedor dos en el año 2019

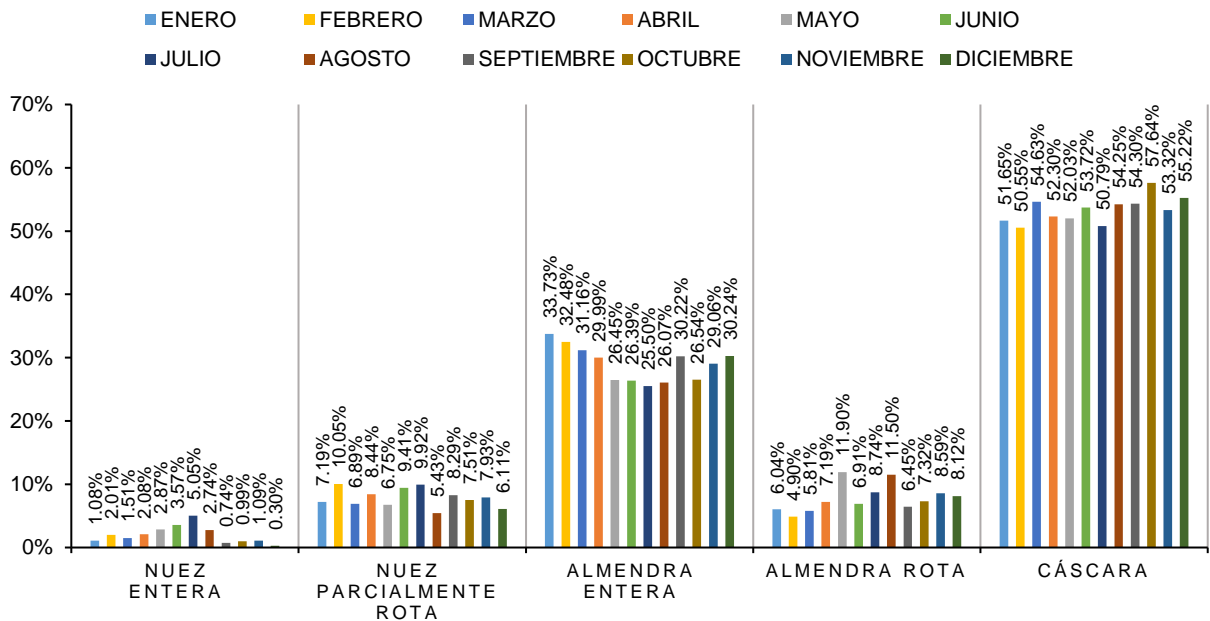


Figura D3. Composición másica del flujo de salida del rompedor tres en el año 2019

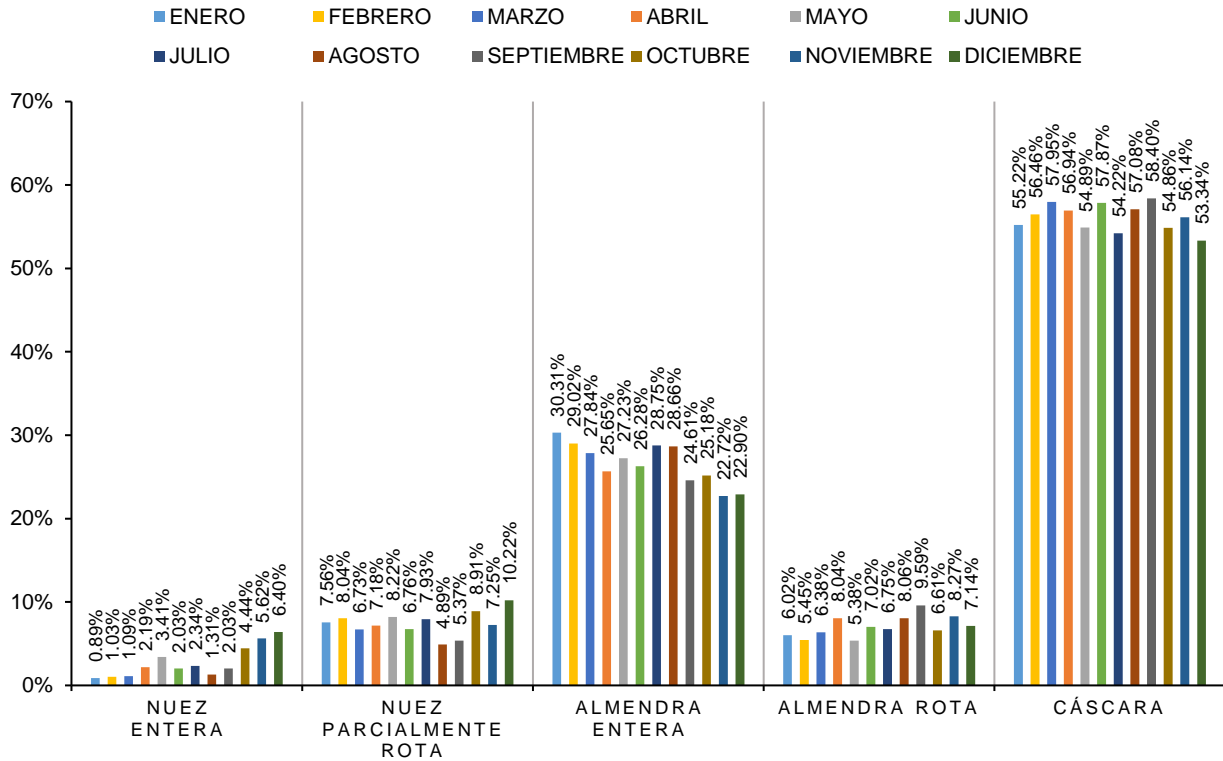


Figura D4. Composición másica del flujo de salida del rompedor cuatro en el año 2019

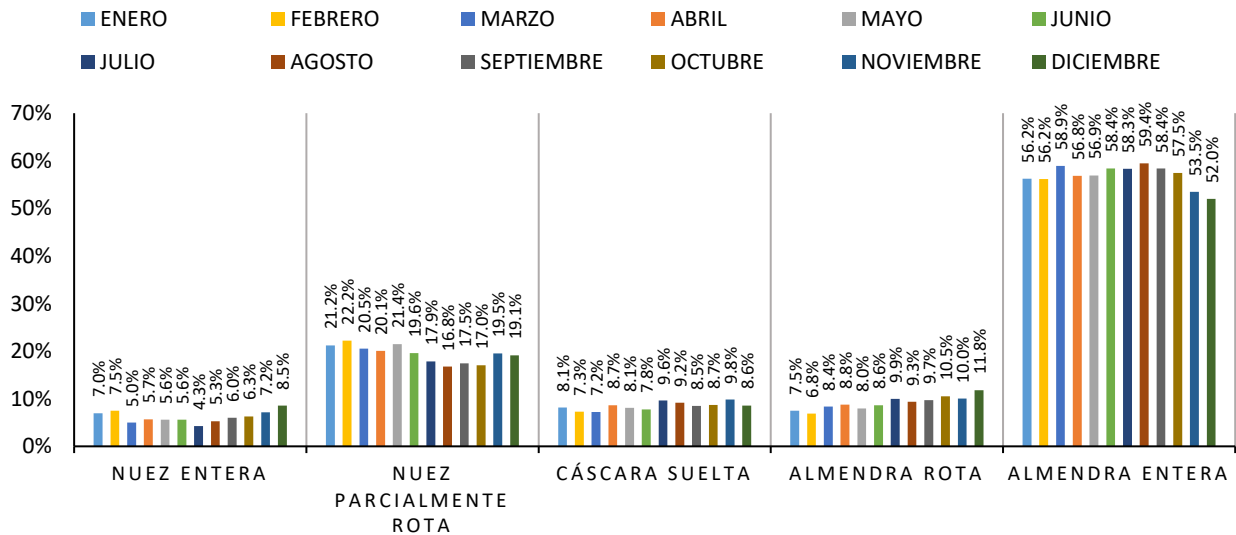


Figura D5. Composición másica del flujo de salida inferior de las columnas de separación neumáticas de almendra-cáscara

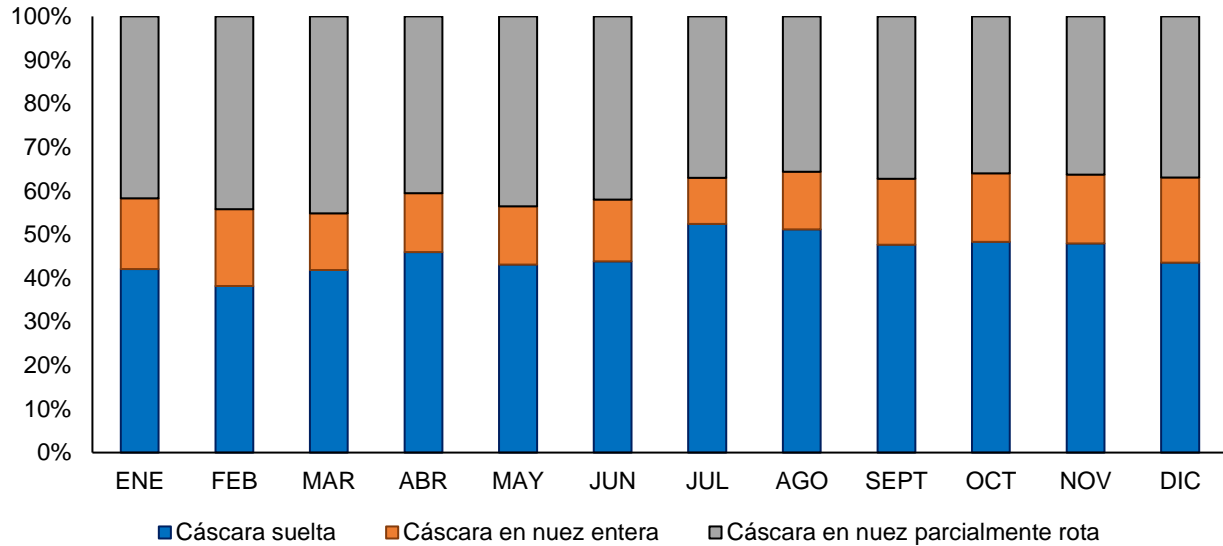


Figura D6. Impureza aportada por la cáscara suelta, cáscara en nuez entera y parcialmente rota al flujo de almendra en la salida inferior de las columnas de separación

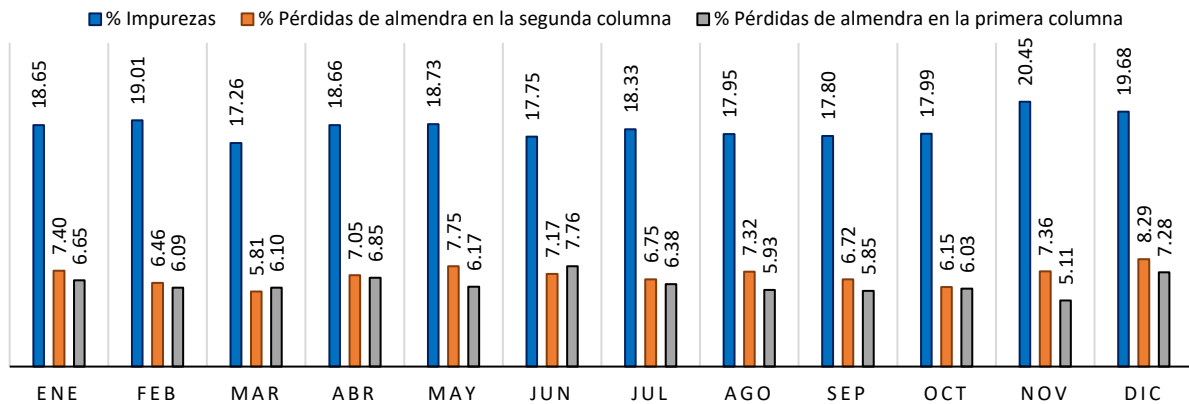


Figura D7. Porcentaje de impureza en la almendra y pérdida de almendra en la primera y segunda columna en el año 2019

Anexo E. Distribución de tamaños de nuez entera, nuez parcialmente rota, almendra entera, almendra rota y cáscara en la entrada y salida de cada columna

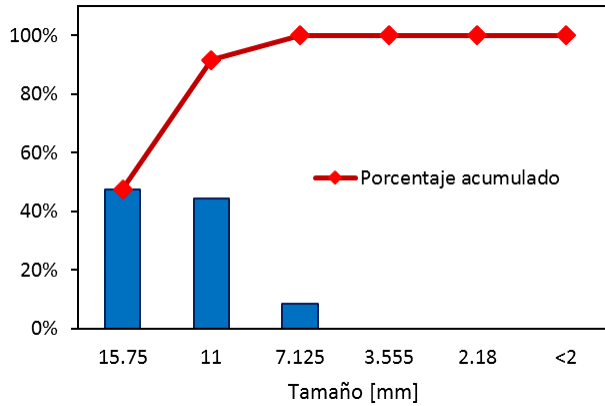


Figura E1. Distribución de tamaño de la nuez entera a la entrada de las columnas

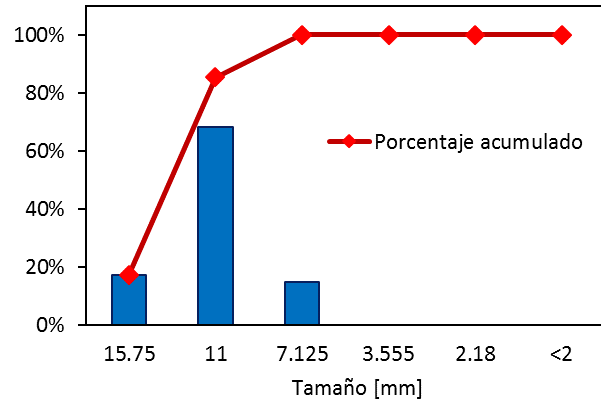


Figura E2. Distribución de tamaño de la nuez parcialmente rota a la entrada de las columnas

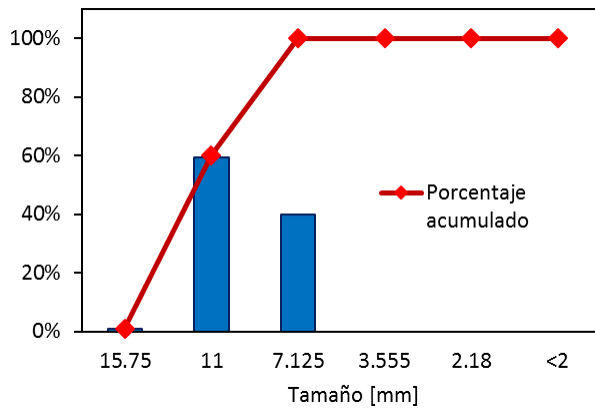


Figura E3. Distribución de tamaño de la almendra entera a la entrada de las columnas

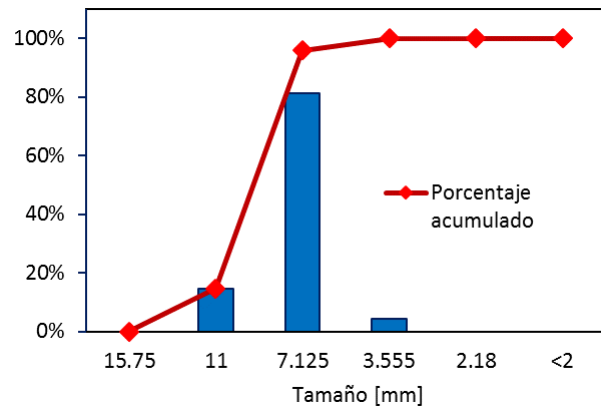


Figura E4. Distribución de tamaño de la almendra rota a la entrada de las columnas

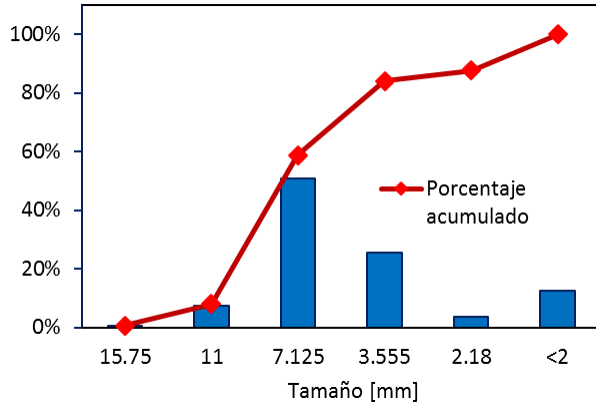


Figura E5. Distribución de tamaño de la cáscara a la entrada de las columnas

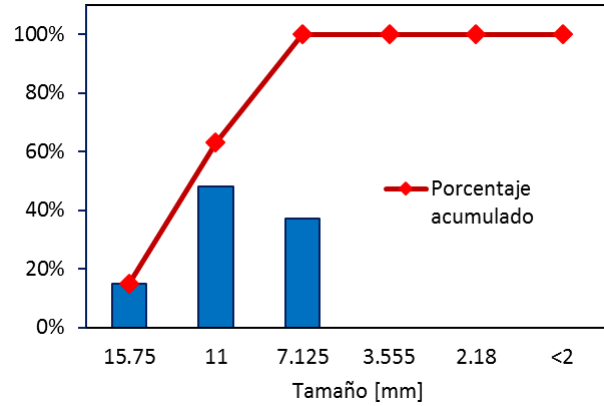


Figura E6. Distribución de tamaño de la nuez entera en la salida inferior de la segunda columna.

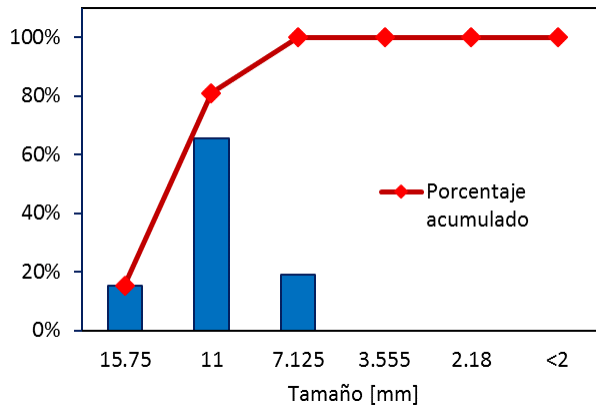


Figura E7. Distribución de tamaño de la nuez parcialmente rota en la salida inferior de la segunda columna

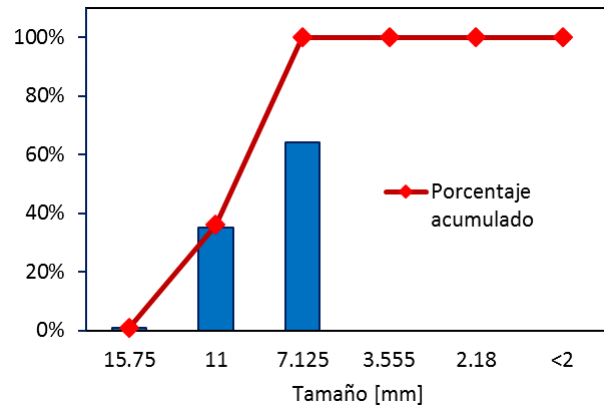


Figura E8. Distribución de tamaño de la almendra entera en la salida inferior de la segunda columna

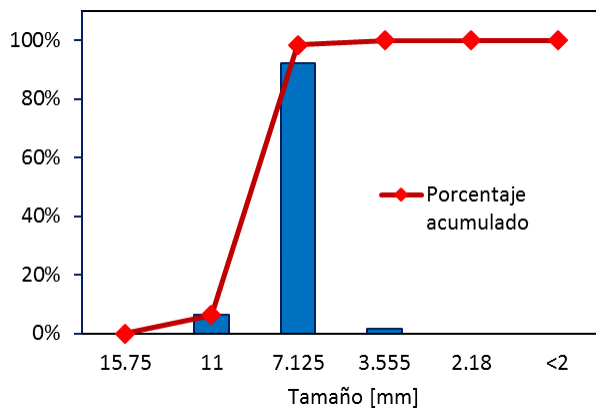


Figura E9. Distribución de tamaño de la almendra rota en la salida inferior de la segunda columna

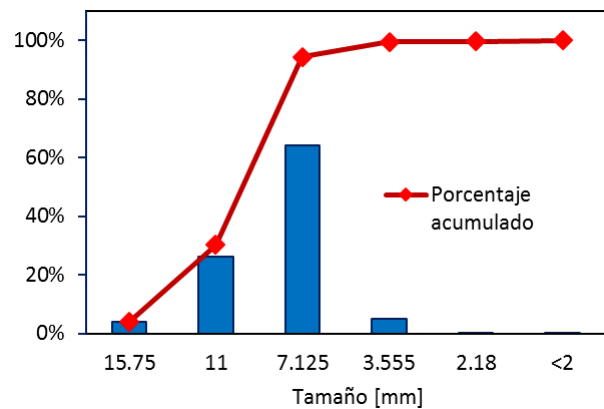


Figura E10. Distribución de tamaño de la cáscara en la salida inferior de la segunda columna

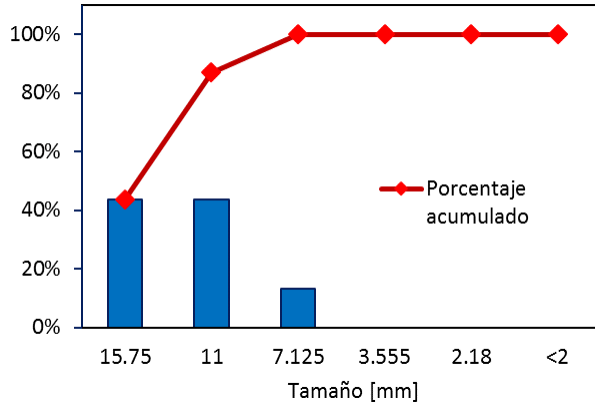


Figura E11. Distribución de tamaño de la nuez entera en la salida inferior de la primera columna

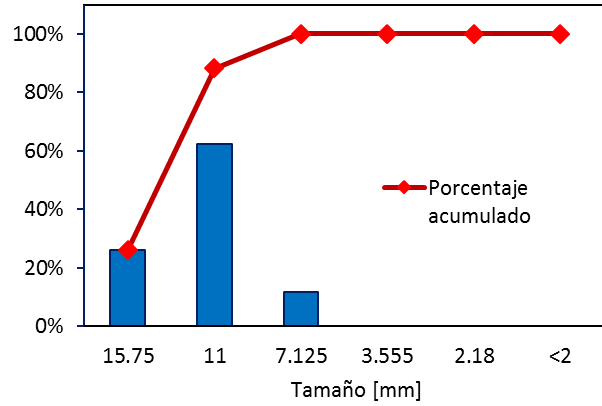


Figura E12. Distribución de tamaño de la nuez rota en la salida inferior de la primera columna

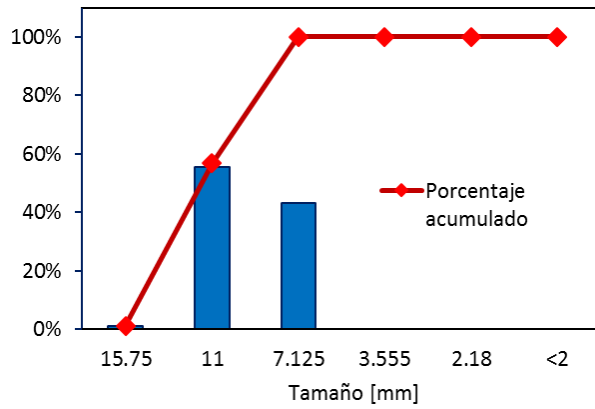


Figura E13. Distribución de tamaño de la almendra entera en la salida inferior de la primera columna

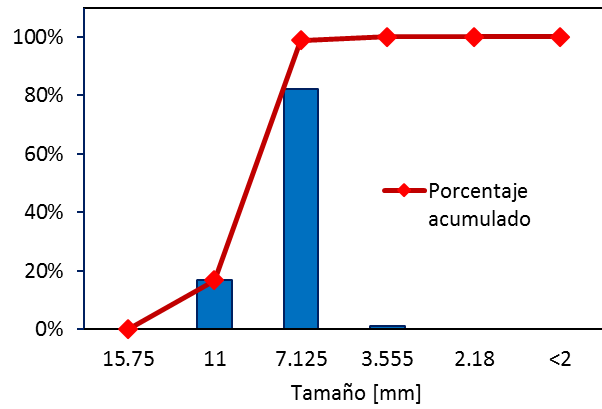


Figura E14. Distribución de tamaño de la almendra rota en la salida inferior de la primera columna

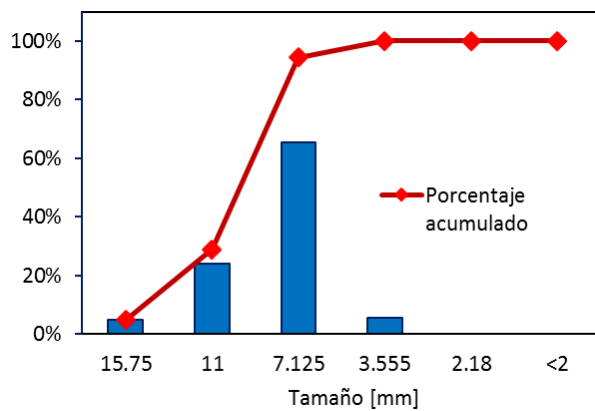


Figura E15. Distribución de tamaño de la cáscara en la salida inferior de la primera columna

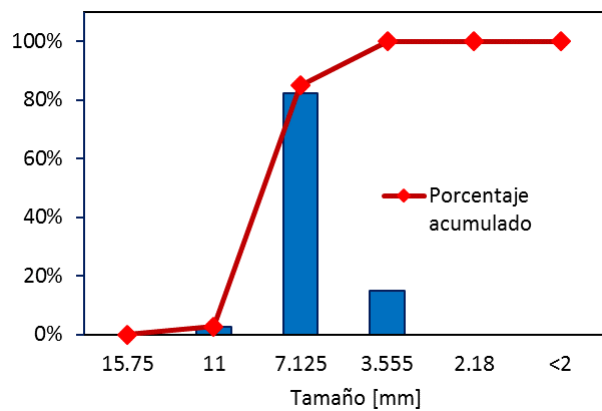


Figura E16. Distribución de tamaño de almendra rota en la salida superior de la primera columna

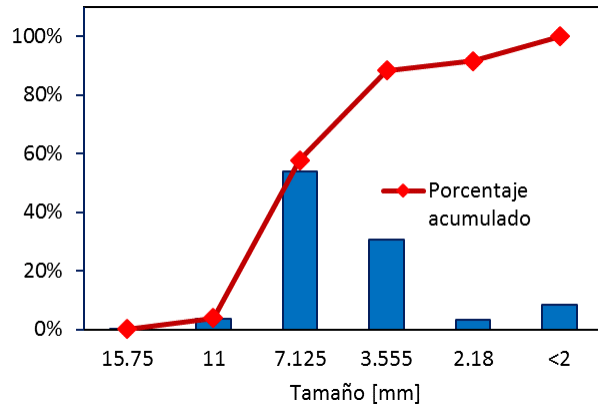


Figura E17. Distribución de tamaño de la cáscara en la salida superior de la primera columna

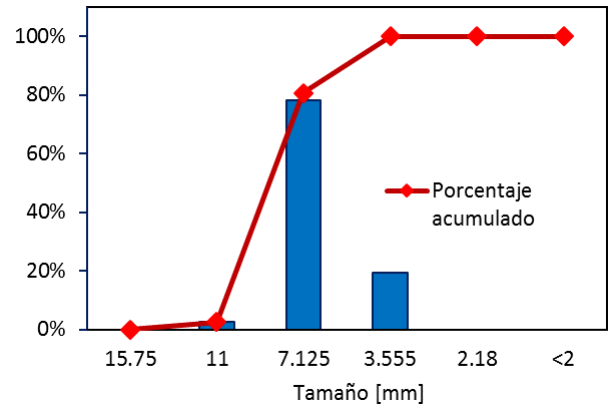


Figura E18. Distribución de tamaño de almendra rota en la salida superior de la segunda columna

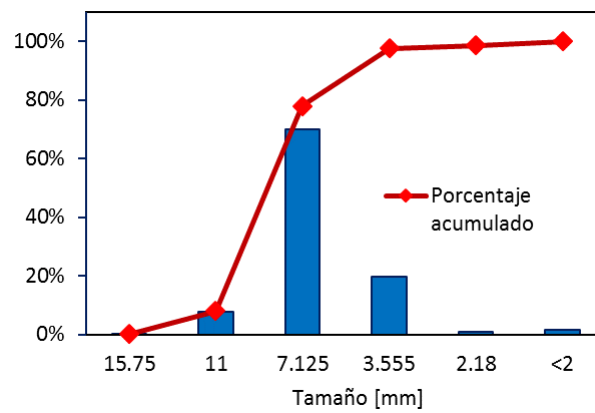


Figura E19. Distribución de tamaño de la cáscara en la salida superior de la segunda columna

Anexo F. Velocidades de fluidización y arrastre teórica y experimental para tamaños determinados de nuez entera, nuez parcialmente rota, almendra entera, almendra rota y cáscara suelta en las columnas de separación.

	Diámetro [mm]	Vel. arrastre teórico [m/s]	Vel arrastre (experimental)* [m/s]	Vel Fluidización teórica [m/s]	Vel Fluidización (experimental) * [m/s]
Nuez entera	15.75	15.57	15.98	2.28	8.78
	11	13.71	14.43	1.97	8.82
	7.13	10.45	14.19	1.39	9.18
Nuez rota	15.75	15.68	15.98	2.29	8.75
	11	12.34	14.98	1.74	8.55
	7.13	9.95	13.98	1.32	8.4
Almendra entera	15.75	12.71	15.13	1.82	8.96
	11	15.92	14.46	2.34	8.44
	7.13	13.54	14.01	1.95	8.7
Almendra rota	11	11.97	NR	1.68	NR
	7.13	12.17	11.95	1.72	4.27
	3.56	8.41	8.57	1.03	3.94
Cáscara	15.75	10.19	NR	1.32	2.67
	11	9.17	NR	1.15	NR
	7.13	8.94	9.86	1.1	5.15
	3.56	7.49	9.56	0.79	3.17
	2.18	5.19	9.03	0.32	3.45
	2	3.14	NR	0.05	NR

*Datos experimentales tomados de: Boletín N° 27 de Cenipalma. Sintonización de las columnas de separación neumáticas.

ANEXO G. Instructivo de operación de las columnas de separación neumáticas
INSTRUCTIVO COLUMNAS DE SEPARACIÓN NEUMÁTICA DE FINOS Y CÁSCARA
PALMERAS DE PUERTO WILCHES S.A
SECCIÓN DE PALMISTERÍA

1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA DE SEPARACIÓN NEUMÁTICA

En las columnas de separación de almendra-cáscara ingresa la mezcla triturada proveniente de los rompedores, en donde la cáscara es fluidizada por la corriente de aire que le ingresa y es separada de la almendra, que cae por gravedad a un transportador, para ser llevadas a los silos de secado. Las columnas de separación neumática están compuestas por dos secciones o zonas de separación, una salida intermedia, un ciclón y un ventilador, como se muestra en la **figura 1**. La corriente de aire es inducida por medio de un ventilador colocado en succión, inmediatamente después del ciclón. El ventilador cuenta con un dámper que permite graduar el caudal de aire en la columna. En el ciclón se separa la cáscara o material particulado que cae desde la pared cilíndrica superior hacia la parte inferior del cono debido a la centrifugación causada por la fuerza del aire, y el aire sale por un tubo superior hacia el ventilador y a su vez es expulsado a la atmósfera (Leon, 2004).

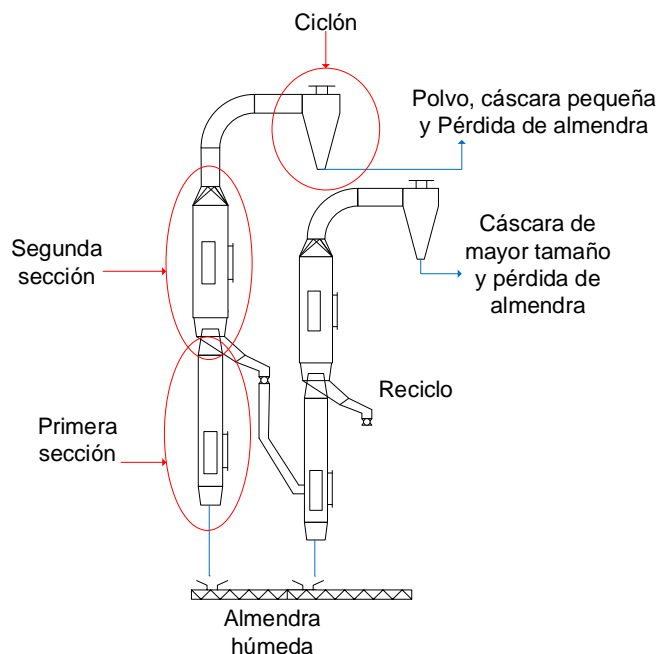


Figura 1. Columnas de separación neumática de almendra-cáscara

2. FUNDAMENTOS MÍNIMA FLUIDIZACIÓN Y ARRASTRE

La separación neumática se debe al principio de fluidización y arrastre, el cual describe el comportamiento de un lecho empacado cuando es atravesado por un fluido que corre de abajo hacia arriba. Cuando se presentan bajas velocidades las partículas permanecen estacionarias, pero al aumentar la velocidad del fluido la caída de presión aumenta de acuerdo con la ecuación de Ergun (Ec. 1) (Geankoplis, 1998). Si sigue aumentando la velocidad, llegará un momento en que la fuerza de la caída de presión por el área de corte transversal iguala a la fuerza gravitatoria sobre la masa de las partículas y las partículas empezarán a moverse (McCabe et al., 2007).

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{150V_{mf}\mu(1-\varepsilon)^2}{\varphi_s^2 D_p^2 \varepsilon^2} + \frac{1.75\rho V_{mf}^2}{\varphi_s D_p} * \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \quad (1)$$

Donde, Δp es la caída de presión, L es la altura del lecho, V_{mf} es la velocidad mínima de fluidización, μ es la viscosidad del aire, ε es la porosidad del lecho, ρ es la densidad del aire, φ es la esfericidad de la partícula y D_p es el diámetro de partícula.

Una vez que el lecho está fluidizado, la caída de presión permanece constante mientras la altura del lecho continúa aumentando al aumentar el flujo del líquido o gas. Finalmente, con una velocidad mayor a la velocidad mínima de fluidización todo el conjunto, lecho y fluido, se comporta como un sistema homogéneo, alcanzando la velocidad de arrastre o de transporte para dicho sistema, la cual está dada por la ecuación 2. (Leon, 2004).

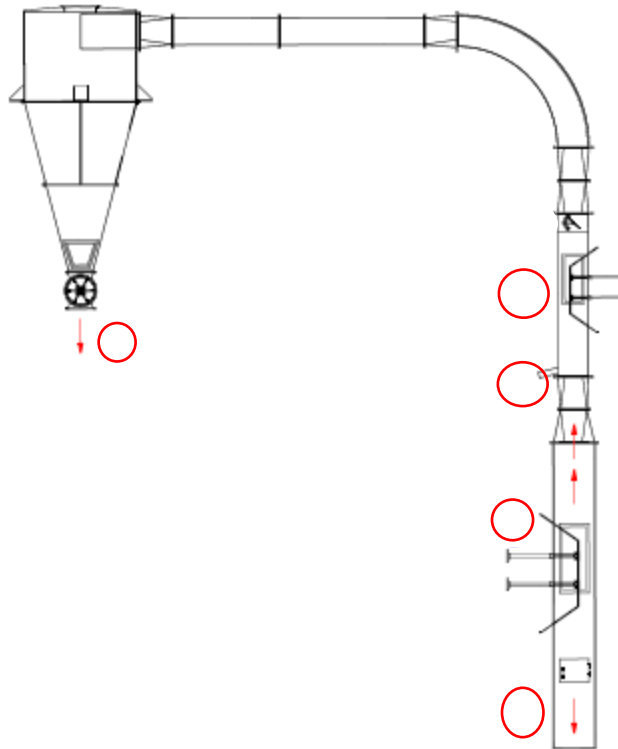
$$V_T = \sqrt{\frac{4g(\rho_p - \rho)\varphi D_P}{3C_D\rho}} \quad (2)$$

Donde, V_T es la velocidad de arrastre, g es la gravedad, ρ_p es la densidad de la partícula, C_D es el coeficiente de rozamiento.

Debido a lo anterior, es posible separar la almendra de la cáscara en las columnas. La velocidad terminal de los componentes de la mezcla triturada es muy variable entre ellos, y por lo tanto, permite la separación y extracción de la almendra dado que, la cáscara posee menores velocidades de arrastre con respecto a la almendra, facilitando su

extracción (*Institusiut Penyelidikan Minyank. Mongana report (translation)*, n.d.) (Menon, n.d.-b).

3. COMPONENTES PRINCIPALES DE LA COLUMNA DE SEPARACIÓN NEUMÁTICA



1. Salida de almendras, hacia los silos de secado.

2. Dámper para regular la velocidad del aire en la primera zona de separación. (Control de impurezas).

3. Salida intermedia de nueces pequeñas, almendras pequeñas, almendras rotas y cáscaras.

4. Dámper para regular la velocidad del aire en la segunda zona de separación. (Control de pérdidas).

2

5. Salida de cáscaras, polvo, almendra pequeña hacia calderas.

Figura 2. Componentes de la columna de separación neumática.

Tomado de: WAMBECK, Noel; BERNAL, Guillermo y CALA, Germán. *Sinopsis del proceso de palma*. Bogotá: Fedepalma, 2005. ISBN 9583380679

4. FUNCIONAMIENTO DE LAS COLUMNAS DE FINOS Y CÁSCARA EN LA EMPRESA PALMERAS DE PUERTO WILCHES S.A

La empresa Palmeras de Puerto Wilches S.A. cuenta con dos columnas dispuestas en serie, como se observa en la **figura 1**. La mezcla triturada que ha salido de los rompedores ingresa a la primera sección de la primera columna (columna de finos) donde la almendra, la nuez entera y la nuez parcialmente rota, que no han sido arrastradas por la corriente de aire, cae por gravedad a un sinfín transportador. En la salida superior sale la cáscara liviana, polvo y almendra rota de menor tamaño considerada como pérdida. Por la salida intermedia pasa almendra entera y rota, nuez entera y parcialmente rota de menor tamaño, así como cáscara de mayor tamaño que no fue arrastrada e ingresan a la primera sección de la segunda columna (columna de cáscara), donde se presenta la separación anteriormente descrita.

La separación neumática se deriva de la operación de fluidización, donde hay que vencer la velocidad de arrastre en el lecho para dar inicio al arrastre de sólidos en el fluido (Leon, 2004). Por esto, se hace necesario controlar el caudal de aire que le ingresa a cada columna y la velocidad de este en cada zona de separación. Cada sección de la columna cuenta con un dámper o pared móvil que permite variar el área de operación o área de circulación de la mezcla triturada, y así poder controlar la velocidad del aire en cada zona, como se muestra en la **figura 3**.

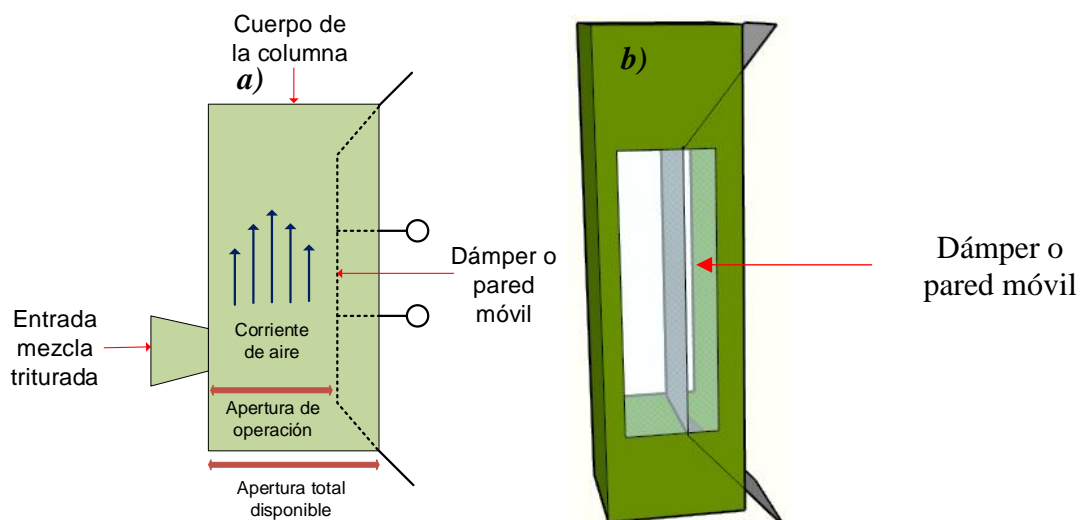


Figura 3. Zona de separación de la columna. **a)** Vista 2D de la zona de separación. **b)** Vista 3D de la zona de separación.

La Corporación Centro de Investigación en Palma de Aceite (Cenipalma) en su boletín técnico 27 presenta la sintonización de las columnas neumáticas en la zona de palmistería, donde plantea los pasos a seguir para ajustar las columnas de acuerdo con el flujo de masa procesado y teniendo en cuenta la relación másica de aire/mezcla triturada procesada en cada columna, la cual se muestra en la **Tabla 1**. Además, recomienda para la primera columna velocidades de 15 m/s en la primera zona y de 12 m/s en la segunda zona (Cala A et al., 2011) (Wambeck, 1999).

Tabla 1. Valores de referencia para la relación aire/material en columnas de separación neumática.

Parámetros de referencia	Relación kg aire/kg material (capacidad del sistema)
	6-9 kg aire/kg fibra (18% fibra/RFF)
Literatura	4-6 kg aire/kg mezcla triturada (11% mezcla triturada/RFF)
Otros valores	900-1000 kg fibra/t RFF procesado
normalmente usados	600-650 kg mezcla triturada/t RFF procesado

5. CONTROL DE LAS COLUMNAS DE SEPARACIÓN

5.1 COLUMNA DE FINOS

A continuación, se presentan algunas recomendaciones para la operación de la columna de finos.

- El dámper en la descarga del aire en el ventilador debe estar en la posición 1 cuando la esclusa en la salida del silo de nuez está en 30 o 36 Hz.
- Poner el dámper en la posición 2 cuando la frecuencia en la esclusa del silo de nuez aumenta a 42 Hz.

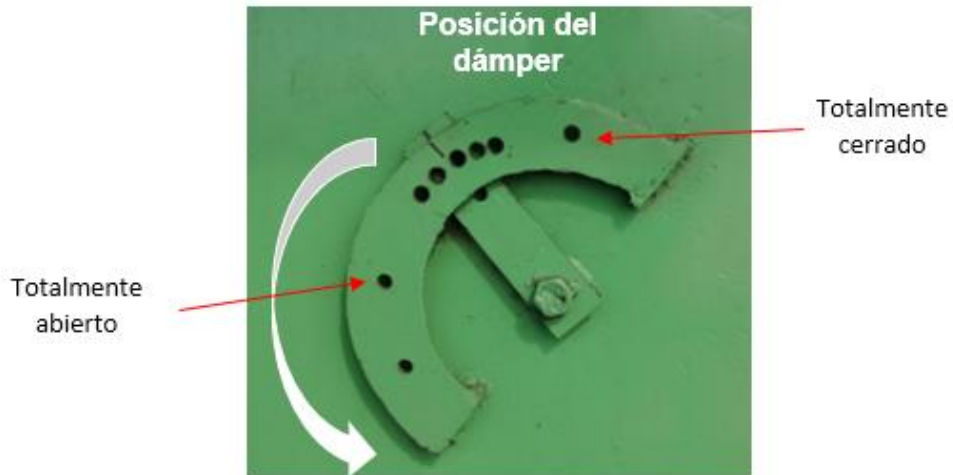


Figura 4. *Dámetro en la descarga del ventilador de finos*

- Cuando el flujo de almendra en la salida inferior de la columna presente altas impurezas se debe aumentar la velocidad del aire en la sección inferior de la columna, cerrando el dámetro o pared móvil correspondiente a la sección 1 cm.



Figura 5. *Dámetro en la zona de separación inferior de la columna*

- Cuando aumenta las pérdidas de almendra en el flujo de cáscara (parte baja del ciclón), estas se pueden reducir disminuyendo la velocidad en la sección superior de la columna abriendo el dámetro o pared móvil 5 cm.



Figura 6. Dámper en la zona superior de la columna

Se debe aclarar, que la velocidad en la zona de separación superior debe ser menor que la velocidad en la zona de separación inferior para que el flujo remanente ingrese a la columna de cáscara. Las velocidades del aire recomendadas son de alrededor de 12 m/s en la zona superior y 15 m/s en la zona inferior con carga, por lo que estando la columna sin carga, estas velocidades deben ser mayores teniendo en cuenta la caída de caudal (Wambeck, 1999)(Cala A et al., 2011).

5.2 COLUMNA DE CÁSCARA

Al igual que la columna de finos, la columna de cáscara posee dos zonas de separación. Debido a que la salida intermedia de la columna no está habilitada, la separación de la mezcla triturada que ingresa a la columna solo se da en la parte inferior, por lo que la zona de separación superior solo sirve como cuerpo de la columna, es decir, en ella no hay separación de la mezcla triturada, solo sirve para que por ahí pase el flujo de cáscara que sale por la parte baja del ciclón. Se debe aclarar que, aunque en la sección superior de la columna no hay separación, la velocidad en esta debe ser igual o mayor que la velocidad en la zona inferior para que así no haya caída del lecho fluidizado.

En consecuencia, la separación solo se da en la parte inferior, por lo que es posible manejar las pérdidas de almendra e impurezas en esta zona.

El control de la columna de cáscara se puede llevar a cabo de dos maneras:

1. Manteniendo la posición del dámper o pared móvil en la zona de separación fija y manipular el dámper en la descarga del ventilador como se muestra en la **figura 7**, siempre y cuando se mueva en posiciones donde se cumpla la relación aire/masa descrita en la **Tabla 1**, lo que permite aumentar o disminuir el caudal de aire en la columna y por

lo tanto variar la velocidad en la zona de separación. Cuando se presente un mayor porcentaje de impurezas aportado por la columna se debe abrir el dámper (posición 4), para así aumentar el caudal y por ende la velocidad en la zona de separación, teniendo en cuenta que la pérdida de almendra se mantenga en rangos considerables. De igual manera, cuando la pérdida de almendra aumente, se debe cerrar el dámper (posición 3) y por ende disminuir la velocidad en la zona de separación.

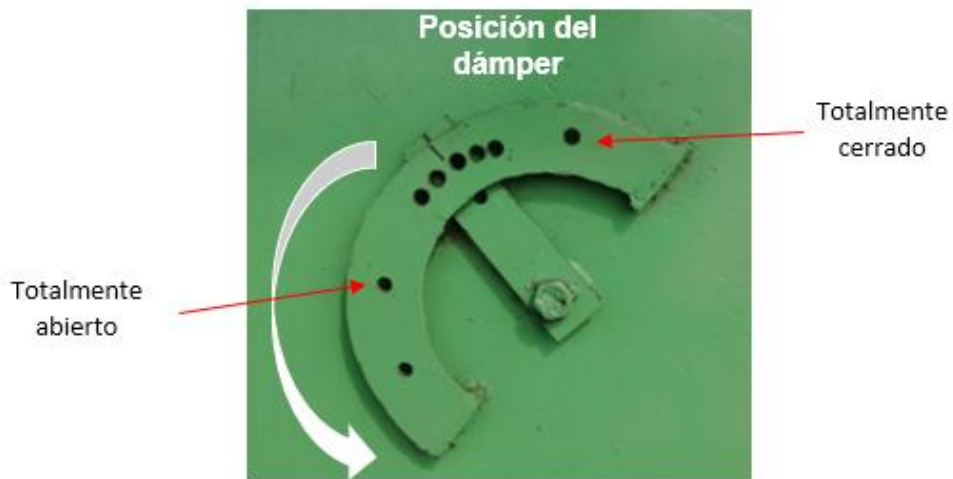


Figura 7. Dámper en la descarga del ventilador de la columna de cáscara.

2. Manteniendo la posición del dámper en la descarga fija y mover el dámper o pared móvil en la zona de separación como se muestra en la **figura 8**. Así, cuando se presente un mayor porcentaje de impurezas aportado por la columna se debe cerrar el dámper para aumentar la velocidad en la zona de separación, teniendo en cuenta que la pérdida de almendra se mantenga en rangos considerables. De igual manera, cuando la pérdida de almendra aumente, se debe abrir el dámper para disminuir la velocidad en la zona de separación.

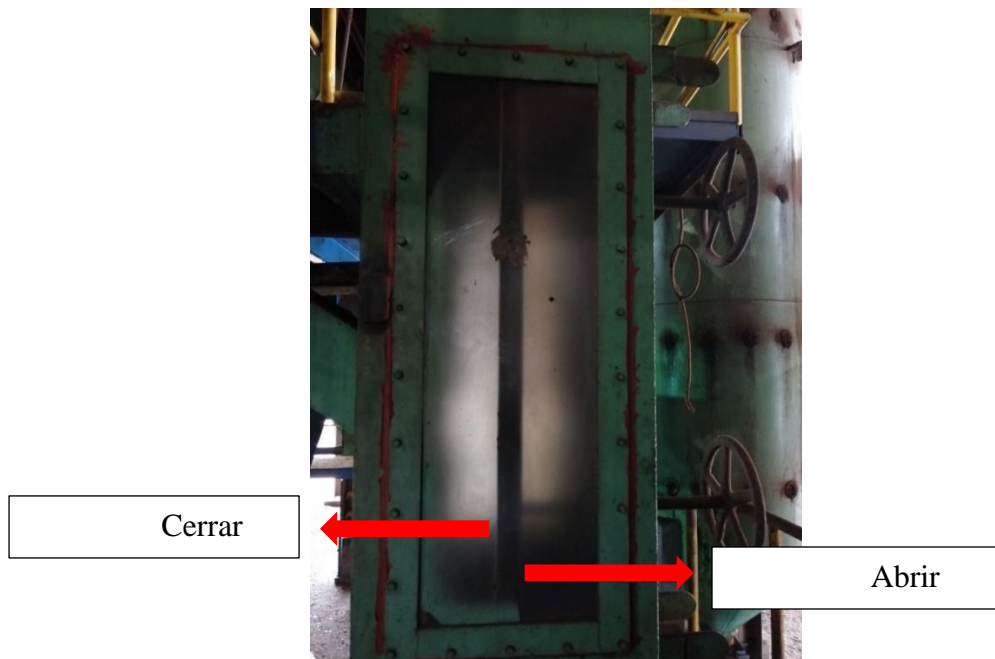


Figura 8. Dámper o pared móvil en la zona inferior de la columna

La columna de cáscara en la parte superior de la segunda sección cuenta con un dámper que permite la entrada de aire a la columna, como se muestra en la **figura 9**. Este dámper debe estar totalmente cerrado, a menos que se mantenga un alto porcentaje de pérdida de almendra después de haber realizado los cambios anteriormente mencionados, para ello se debe abrir ligeramente el dámper.

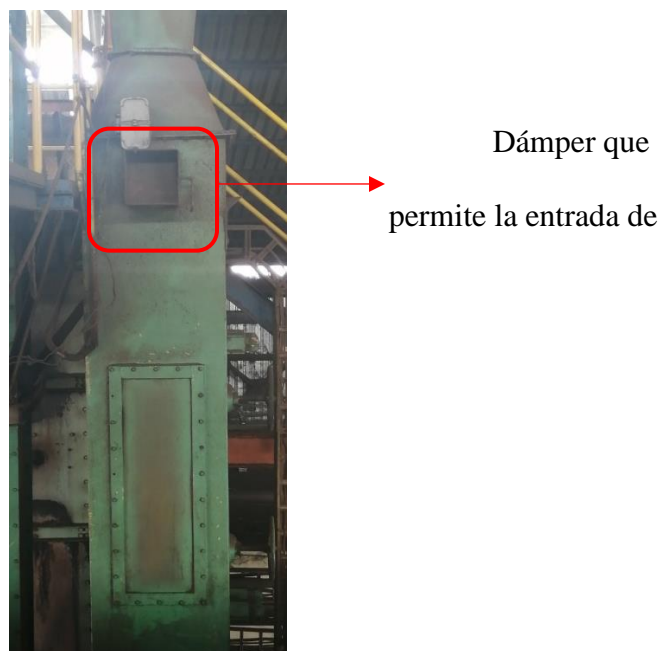


Figura 9. Segunda zona de separación de la columna de cáscara.

6. CONDICIONES ACTUALES DE OPERACIÓN

6.1. COLUMNA DE FINOS

Sección de la columna	Apertura del dámara [m]
Zona de descarga	Posición 1 (esclusa silo nuez posea una frecuencia de 30 o 36 Hz) Posición 2 (esclusa silo nuez posea una frecuencia de 42)
Primera sección	0.28
Segunda sección	0.53

6.2. COLUMNA DE CÁSCARA

Sección de la columna	Apertura del dámara [m]
Zona de descarga	Entre la posición 3 y 4
Primera sección	0.285
Segunda sección	0.18

7. CONDICIONES EN LAS CUALES LAS IMPUREZAS PUEDEN AUMENTAR

- Aumento de la nuez entera y rota en la banda por falta de ajuste en los rompedores
Recomendación: Ajustar el o los rompedores que presenten inconvenientes.

NOTA: Prestar mayor atención a los rompedores 1 y 2 que procesan del 60 al 70% de la nuez.

- Características de la nuez: como nuez con cáscara gruesa y pesada. Por ende, no es posible que sea extraída por el flujo de aire.
- Aumento del flujo másico en la entrada a las columnas
- Taponamiento en el interior de las columnas

8. CONDICIONES EN LAS CUALES LA PÉRDIDA DE ALMENDRA PUEDE AUMENTAR

- Uno o más rompedores están muy ajustados, y por lo tanto aumenta el porcentaje de almendra rota en la pérdida. Al suceder esto, el tamaño de la almendra en la corriente

es de menor tamaño, alrededor de 4 mm. Por ende, se recomienda desajustar el o los rompedores que presenten mayor cantidad de almendra rota y no mover los dámpers en las columnas.

- Filtraciones de aire a la columna. Por lo tanto, aumenta la velocidad en la zona superior. Se recomienda tapar los orificios que estén causando filtraciones, además de realizar inspecciones periódicas a las columnas.
- Bajo flujo másico en la entrada a las columnas. Se recomienda aumentar el flujo másico. Si no es posible, disminuir el caudal de aire en la columna y cerrar el dámper en la primera sección.

BIBLIOGRAFÍA

- A, I. A. V. M. S. (n.d.). Catálogo Ripple Mill. Retrieved from <https://es.scribd.com/document/242454969/CATALOGO-RIPPLE-MILL-doc>
- Alberto, W., Lara, A., Laboratorio, J. D. E., Luis, I. N. G., & Ávila, M. D. E. (n.d.). *Influencia del contenido de cuezco sobre el residual de aceite de palmiste en la torta de palmiste*.
- Cala A, S. L. (2006). *Análisis de la operación de separación fibra – nuez en columna neumática apoyado en evaluaciones realizadas a escala piloto*. Universidad Industrial de Santander.
- Cala A, S. L., Yáñez Angarita, E. E., & García Núñez, J. A. (2011). *Recuperación de almendra: Sintonización de columnas de separación neumáticas en plantas de beneficio*.
- Cala, S., Yáñez, E., & García, J. A. (2011). *Manual de procedimientos de laboratorio en plantas de beneficio*. Bogotá: CENIPALMA.
- Case, F. (2010). *Implementación de buenas prácticas operativas: caso Frupalma* *Implementation of Best Operating Practices : Introducción Metodología*. 31(4), 74–83.
- Gaitán, G. C., & Castillo, G. B. (n.d.). *Procesos modernos de extracción de aceite de palma*.
- Garcés, I. C., & Sánchez, M. C. (1997). *Productos derivados de la industria de la palma de aceite. Usos 1*. (1), 33–48.
- Geankoplis, C. J. (1998). *Procesos de transporte y operaciones unitarias* (Tercera ed). COMPAÑÍA EDITORIAL CONTINENTAL, S.A. DE C.V. MÉXICO.

- Halim, R. M., Ramli, R., Rahmat, C., Mat, C., & May, C. Y. (2016). *Dry Separation of Palm Kernel and Palm Shell Using a Novel Five-Stage Winnowing Column System*. (April). <https://doi.org/10.3390/technologies4020013>
- Hamblin, F. K., Amiento, F., La, O. D. E., Sobre, D. E. I., & Operacion, L. A. (1991). *Extracción de aceite de palma y nuevos criterios de procesamiento*. 12. *Institiut Penyelidikan Minyak. Mongana report (translation)*. (n.d.). 2.
- Leon, A. Y. (2004). Evaluación técnica y económica de pérdidas de almendra en las columnas de separación neumática del proceso de palmistería en las plantas extractoras de aceite de palma africana en la Zona Central. *Tesis*, 1–123.
- Mathews, J., Lee, A. K., & Rao, S. (2004). *Contenido de aceite en el racimo y mesocarpio del fruto de la palma de aceite , y algunos de sus factores fisiológicos y agronómicos * Oil Content in Oil Palm Fruit Mesocarp and Bunch , and Some of its Related Physiological and Agronomical Factors*. 25(4), 11–29.
- McCabe, W. L., Smith, J. C., & Harriot, P. (2007). *Operaciones unitarias en Ingeniería Química* (Séptima ed). McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. de C.V.
- Menon, N. R. (n.d.-a). *Mongana Basics : Part 21 – The Separation of Fibre from Nuts ***. (94), 49–65.
- Menon, N. R. (n.d.-b). *Mongana Basics : Part 22 – Separation of the Cracked Mixture ***. 33–41.
- Mesa, G. R. (n.d.). *Variaciones tecnológicas en el diseño de trituradores " ripple mill "* *Technological modifications in the ripple mill design*. 352–356.
- Montgomery, D. C. (n.d.). *Design and analysis of experiments* (5th ed.).
- Pantzaris, T. P., Jaaffarahmad, M., Origen, E. L., & Aceite, D. E. L. (2002). *Propiedades y usos del aceite de palmiste Properties and Utilization of Palm Kernel Oil*. 2(35), 11–23.
- Rubiano, G. (1998). Mejoramiento en la extracción de aceite de palmiste. *PALMAS*, 19(1), 299–304.
- Series, I. O. P. C., & Science, M. (2018). *Selection of Optimal Factor Level From Process Parameters in Palm Oil Industry Selection of Optimal Factor Level From Process Parameters in Palm Oil Industry*. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/288/1/012056>
- Suárez, Q. D., Yáñez, E., García, J. A., Cárdenas, S., Granados, J. F., & Bustillo, L. (2000). Evaluación del proceso de recuperación de almendra. *Revista PalmasPalmas*,

21, 357–365.

Ura. (n.d.). Fruto de la palma de aceite. Retrieved from <https://ura.farm/fertilizacion-palma-de-aceite/palm-oil-fruit/>

Wambeck, N. (1999). *Oil Palm Process Synopsis. I*, 1–737.

Zone, E. (n.d.). *Reducción de pérdida de almendra en tres plantas de la Zona Oriental*
Reduction of the Loss of Kernel in Three Plants in the Eastern Zone. 438–442.