

**EVALUACIÓN DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN DE UN EQUIPO  
SEPARADOR GRAVIMÉTRICO DE CÁSCARAS Y ALMENDRAS EN LA  
PLANTA DE BENEFICIO EXTRACTORA CENTRAL S.A**

**GENNY CATHERINE GUERRERO AMAYA**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2009**

**EVALUACIÓN DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN DE UN EQUIPO  
SEPARADOR GRAVIMÉTRICO DE CÁSCARAS Y ALMENDRAS EN LA  
PLANTA DE BENEFICIO EXTRACTORA CENTRAL S.A**

**GENNY CATHERINE GUERRERO AMAYA**

**Trabajo de grado para optar por el título de  
Ingeniero Químico**



**Director**

**RAMIRO MARTÍNEZ REY**

**Ingeniero químico Ph.D**



**Co-directores**

**EDGAR YÁÑEZ ANGARITA. Ing. Químico**

**ALDEMAR MARTÍNEZ GONZÁLEZ. Ing. Químico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2009**

## AGRADECIMIENTOS

- Al Centro de Investigación en Palma de Aceite **Cenipalma**, en especial a los Ingenieros: Edgar Yáñez Angarita, Aldemar Martínez González y Diego Nieto
- A la Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería Química
- A mi familia

*...Pero, en cambio, he encontrado en todas partes la sollicitación inteligente, el motivo de meditación, formas de arte, de poesía, mitos, más constructivos para comprender al hombre que cientos de libros escritos en las bibliotecas por hombres jactanciosos de conocer al Hombre.*

*Los pasos perdidos- A. Carpentier*

*A mis padres, hermanos y sobrinos*

*A Jose*

*Amigos, compañeros y colegas*

## CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>1. CONCEPTOS TEÓRICOS DEL PROCESAMIENTO DEL FRUTO DE LA PALMA AFRICANA</b> .....	3
<b>1.1 EXTRACCIÓN Y CLARIFICACIÓN</b> .....	3
<b>1.2 RECUPERACIÓN DE LA ALMENDRA: PALMISTERÍA</b> .....	4
<b>1.3 ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS EN LA SEPARACIÓN DE ALMENDRAS Y CÁSCARAS</b> .....	7
<b>1.3.1 Métodos de separación por vía húmeda</b> .....	7
<b>1.3.2 Métodos de separación por vía seca</b> .....	8
<b>1.3.3 El separador gravimétrico o mesa densimétrica</b> .....	9
<b>1.3.3.1 Antecedentes de la mesa gravimétrica</b> .....	10
<b>1.3.3.2 Principio de operación</b> .....	10
<b>2. DESARROLLO EXPERIMENTAL</b> .....	11
<b>2.1 CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA ACTUAL</b> .....	11
<b>2.2 EXPLORACIÓN Y PLANEACIÓN DE ENSAYOS PARA LA EVALUACIÓN OPERATIVA DEL SEPARADOR TIPO MESA GRAVIMÉTRICA</b> .....	12
<b>2.3 EVALUACIÓN DE INGRESOS EN LA EXTRACTORA CENTRAL</b> .....	15
<b>3. RESULTADOS Y ANÁLISIS</b> .....	16
<b>3.1 RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DEL SISTEMA ACTUAL</b> .....	17
<b>3.2 RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN OPERATIVA DEL SEPARADOR GRAVIMÉTRICO</b> .....	18

3.2.1 Condiciones de operación adecuadas para la mesa gravimétrica.....	18
3.2.2 Efecto de los factores de estudio sobre las variables respuesta.....	19
3.3 IMPLICACIONES EN EL MONTAJE DEL SEPARADOR GRAVIMÉTRICO PARA LA EXTRACTORA CENTRAL S.A.....	21
3.3.1 Eficiencia y parámetros de calidad en los sistemas de recuperación de almendra para la Extractora Central S.A.....	22
3.3.2 Consumo energético en la sección de palmistería en la Extractora Central S.A.....	23
3.3.3 Evaluación de ingresos por recuperación de almendra y calidad en la Extractora Central S.A.....	23
4. CONCLUSIONES.....	25
BIBLIOGRAFÍA.....	25
ANEXOS.....	27

## LISTA DE FIGURAS

	<b>PÁG</b>
<b>Figura 1.</b> Diagrama de proceso de la sección de palmistería en la Extractora Central S.A.....	5
<b>Figura 2.</b> Columna neumática de separación almendra-cáscara.....	6
<b>Figura 3.</b> Vista superior del equipo de separación gravimétrico.....	9
<b>Figura 4(a).</b> Separador gravimétrico de semillas de trébol y geranio.....	10
<b>Figura 4(b).</b> Separador por gravedad específica de granos, nueces y semillas.....	10
<b>Figura 5.</b> Diagrama de flujo de la sección de palmistería.....	12
<b>Figura 6.</b> Esquema de corrientes de entrada y salida del equipo de separación gravimétrica.....	14
<b>Figura 7.</b> Balance de masa promedio en la sección de palmistería.....	16

## LISTA DE GRÁFICAS

	<b>PÁG</b>
<b>Gráfica 1(a).</b> Efecto de la velocidad de rotación sobre la eficiencia .....	20
<b>Gráfica 1(b).</b> Efecto de la velocidad de rotación sobre el porcentaje de pérdidas de almendra (PER) e impurezas (IMP) .....	20
<b>Gráfica 2(a).</b> Efecto de la inclinación lateral sobre la eficiencia ER, EP, EC.....	20
<b>Gráfica 2(b).</b> Efecto de la inclinación lateral sobre el porcentaje de pérdidas de almendra (PER) e impurezas (IMP) .....	20
<b>Gráfica 3(a).</b> Efecto de la inclinación longitudinal sobre la eficiencia ER, EP, EC .....	20
<b>Gráfica 3(b).</b> Efecto de la inclinación longitudinal sobre el porcentaje de pérdidas de almendra (PER) e impurezas (IMP) .....	20

## LISTA DE TABLAS

	PÁG
<b>Tabla 1.</b> Velocidad de arrastre para diferentes partículas en una corriente de aire.....	6
<b>Tabla 2.</b> Rango de niveles seleccionados para la evaluación operativa de la mesa gravimétrica.....	13
<b>Tabla 3.</b> Diseño de experimento completamente al azar con estructura factorial.....	14
<b>Tabla 4.</b> Indicadores de eficiencia de rompedores.....	17
<b>Tabla 5.</b> Indicadores para el sistema actual de recuperación de almendra en la Extractora Central S.A.....	18
<b>Tabla 6.</b> Tratamientos con los mayores rendimientos de recuperación de almendra y bajos niveles de pérdidas de almendra e impurezas.....	19
<b>Tabla 7.</b> Comparación entre las corrientes de alimento a la mesa gravimétrica para la extractora sur del Casanare y la Extractora Central.....	22
<b>Tabla 8.</b> Eficiencias reales de recuperación de almendra en diferentes configuraciones para la Extractora Central.....	22
<b>Tabla 9.</b> Consumo energético para los sistemas de recuperación de almendra para la Extractora Central.....	23
<b>Tabla 10.</b> Comparación de ingresos anuales (estimados para el año 2008) por recuperación de almendra, pérdida y calidad en diferentes configuraciones.....	24

## LISTA DE ANEXOS

	PÁG
ANEXO A. Diagrama de flujo en la sección de extracción y clarificación de la Extractora Central S.A. ....	28
ANEXO B. Equipos diseñados para la separación de almendra-cáscara por vía seca .....	29
ANEXO C. Principales equipos considerados en el consumo de energía en la sección de palmistería .....	30
ANEXO D. Análisis estadístico .....	30
D1. Análisis estadístico de comparación de medias entre tratamientos .....	31
D2. Análisis estadístico de las principales variables respuesta .....	35
D3. Análisis multivariado de los tratamientos evaluados .....	38

## RESUMEN

**TÍTULO:** EVALUACIÓN DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN DE UN EQUIPO SEPARADOR GRAVIMÉTRICO DE CÁSCARAS Y ALMENDRAS EN LA PLANTA DE BENEFICIO EXTRACTORA CENTRAL S.A\*

**AUTOR:** Guerrero A., Genny Catherine\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Palmiste-Separación vía húmeda-Separación vía seca- Separador gravimétrico-Palmistería-Pérdidas-Impurezas-Eficiencia

El presente trabajo es el resultado del estudio de operación de un separador gravimétrico en la sección de palmistería de una planta procesadora del fruto de palma africana. La metodología, comprende una etapa preliminar donde se caracterizó el sistema actual de la planta por medio de balances de masa y se emprendió el reconocimiento mecánico y operativo del equipo. Posteriormente, se implementó la evaluación de composición del perfil de salida de productos en el separador gravimétrico con un diseño de experimento completamente al azar con estructura factorial, cuyos factores de estudio corresponden a la velocidad de rotación-oscilación y ángulos de inclinación lateral y longitudinal; y como variables respuesta, la eficiencia real y potencial de recuperación de almendra, la eficiencia de recuperación de cáscaras e índices de calidad como impurezas y pérdidas. Finalmente, de acuerdo al análisis estadístico, se observó una tendencia al incremento de la eficiencia real y potencial de recuperación tanto de almendras y cáscaras en la medida en que se aumenta la velocidad de rotación y el ángulo longitudinal, caso contrario sucede cuando se incrementa el ángulo de inclinación lateral. Con respecto a los parámetros de calidad, se observó que las pérdidas de almendra se favorecen (niveles bajos de pérdida) con el incremento en la velocidad de rotación y del ángulo de inclinación longitudinal, situación adversa ocurre con las impurezas.

La operación adecuada de la mesa gravimétrica responde al rango de velocidades de rotación entre 400 y 420 rpm (niveles superiores), con una inclinación lateral mínima que oscila entre 3,18 – 3,71° y un ángulo de inclinación longitudinal mínimo que puede variar entre 1,46 – 2,28°.

\*Proyecto de grado

\*\*Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Ramiro Martínez Rey

## SUMMARY

**TITLE:** EVALUATION OF THE PROCESS VARIABLES IN A GRAVIMETRIC PALM KERNEL AND SHELL SEPARATOR IN THE PROFIT PLANT **EXTRACTORA CENTRAL S.A\***

**AUTHOR:** Guerrero A., Genny Catherine\*\*

**KEY WORDS:** Palm kernel- Wet separation-Dry separation- Gravimetric separator-Kernel recovery-Kernel losses- Kernel impurities-Efficiency

This work is the result of the operating study of a gravimetric separator on the kernel recovery section of an African palm fruit processing plant. The methodology comprises a preliminary stage where the current plant system was characterized through mass balances and the mechanical and operative recognition the equipment was started. Later, was implemented the evaluation of the composition output-profile of products in the gravimetric separator with a completely randomized experimental design with factorial structure, whose study factors are the rotation-oscillation speed and lateral and longitudinal angles; and response variables are the real and potential recovery efficiency of kernel, the shells recovery efficiency and quality indicators as impurities and losses. Finally, according to statistical analysis, there was a trend towards increasing the real and potential recovery efficiency of both kernel and shells to the extent that it increases the rotation speed and the longitudinal angle, otherwise occurs when increasing the lateral angle. With regard to quality parameters, was observed that kernel losses are favored (low losses) with increasing rotation speed and longitudinal inclination angle, adverse situation occurs with impurities. the suitable gravimetric table operation it's in accord with a velocities range between 400 and 420 rpm (higher levels), with a minimum lateral inclination ranging from 3,18 to 3,71° and an minimum angle of longitudinal inclination ranges from 1,46 to 2,28°.

\*Level Project

\*\*Physicochemical Engineering Faculty. Chemical Engineering School. Director: Ramiro Martínez Rey

## INTRODUCCIÓN

Para las plantas de beneficio del fruto de la palma de aceite, el mejoramiento del proceso de palmistería ha cobrado relevancia por ser una fuente de ingresos importante, dado el incremento en las aplicaciones del aceite de palmiste en el mercado de los productos oleoquímicos; y del cuesco o cascarilla como combustible para los equipos de cogeneración de vapor y energía eléctrica, además del uso ya tradicional de la torta de palmiste como fuente de proteína para alimentación animal.

La sección de recuperación de almendras o palmistería en el proceso de beneficio de fruto de palma tiene por objeto efectuar la ruptura de las nueces y posteriormente hacer la recuperación de las almendras, mediante una combinación de sistemas neumáticos y sistemas hidrodinámicos para separarla de las cáscaras.

Aún cuando el porcentaje de pérdidas en la zona central es sólo 0,08%/RFF (RFF: racimos de fruto fresco) por encima de la referencia internacional, el consumo energético en la operación, así como las impurezas en la almendra, ocasionan problemas de consideración a las plantas extractoras en el país, puesto que afectan directamente sus costos de producción y disminuyen la tasa de extracción de almendra. Según estudio realizado por Cenipalma<sup>1</sup>, del promedio de 4,7%/RFF de Tasa de Recuperación de Almendra (2006), 0,8% corresponde a impurezas y humedad.

El estudio realizado por Cenipalma (DUARTE, Et al) muestra que el 62% de las plantas que poseen extracción de aceite de palmiste en el país poseen un sistema de separación de almendra-cuesco Vía Seca, es decir, mediante el uso exclusivo de columnas neumáticas. Así mismo, el 38% de estas plantas, emplea de manera conjunta la separación seca y húmeda, observando que la pérdida de

---

<sup>1</sup> DUARTE, Gustavo. Et al. Evaluación del proceso de extracción de aceite y torta de palmiste. Cenipalma. 2007 (Documento en edición)

almendra es menor hasta en un 0,24%/RFF con respecto al sistema vía seca, reportándose a su vez una disminución considerable en el porcentaje de impurezas.

Si bien los beneficios presentados por los sistemas de separación vía combinada con respecto a los de vía seca son evidentes, se contrasta con los altos costos por mantenimiento, consumo de agua y energía. Estos inconvenientes plantean la necesidad de buscar nuevas alternativas tecnológicas tendientes al aumento de la eficiencia en esta etapa del proceso, mediante la disminución de costos de operación y mantenimiento, así como la reducción de pérdidas e impurezas.

Aun cuando la agroindustria en el mundo actualmente cuenta con herramientas efectivas para la limpieza de granos y la automatización en sus procesos, éstas no son aplicadas en la recuperación de almendra de palma debido a que no existen estudios que evalúen su desempeño para las condiciones particulares del fruto de palma de aceite. La evaluación de un separador gravimétrico, permitirá avanzar en la búsqueda de alternativas tecnológicas eficientes para las plantas extractoras. Esta evaluación es posible con el desarrollo de una metodología establecida en dos etapas fundamentales:

- Reconocimiento mecánico y operativo del equipo separador gravimétrico, incluyendo evaluación y caracterización de los flujos de alimentación para el sistema de estudio y consumo energético de la sección de separación de cáscaras y almendras.
- Evaluación de composición del perfil de salida de productos en el separador gravimétrico para diferentes combinaciones de los factores de estudio: velocidad de rotación-oscilación y los ángulos de inclinación lateral y longitudinal.

Con la aplicación de esta metodología, se pretende describir el comportamiento de las variables respuesta (recuperación de almendras, pérdidas e impurezas) en función de los factores de estudio y establecer las condiciones de operación

adecuadas para la mesa gravimétrica de acuerdo a los resultados obtenidos en los mejores tratamientos.

## **1. CONCEPTOS TEÓRICOS DEL PROCESAMIENTO DEL FRUTO DE PALMA AFRICANA**

El componente de la palma que constituye su potencial comercial, es el fruto, que está formado por el pericarpio o fina capa exterior, el mesocarpio o pulpa que contiene el aceite; y el endocarpio o cuesco que recubre la semilla.

La industria de la palma africana tiene como objetivos principales, la extracción del aceite contenido en el mesocarpio y la recuperación de la semilla para producción de aceite de palmiste. La tecnología de procesamiento se resume en un esquema general, que se basa en tres etapas fundamentales: La extracción del aceite de palma, la clarificación y la recuperación de almendra o palmiste.

### **1.1 EXTRACCIÓN Y CLARIFICACIÓN**

El proceso general, comienza con la recepción de los racimos provenientes de las plantaciones, siguiendo por el acondicionamiento en la etapa de esterilización, donde se logra detener la formación de ácidos grasos, el rompimiento de las celdas que contienen el aceite y la inhibición de compuestos como proteínas y almidones para facilitar la recuperación del aceite y su clarificación.

De los racimos esterilizados se desprenden los frutos que se conducen al proceso de digestión para facilitar el prensado y completar el rompimiento de las celdas de aceite emprendido en la esterilización. Posteriormente se procede a la etapa de prensado o extracción mecánica, de donde finalmente se obtienen dos corrientes separadas:

- El licor de prensa: una mezcla líquida de aceite, agua y lodos; que se conduce a la etapa de clarificación.
- La torta conformada por nuez y fibra, con una composición másica aproximada de 65% y 35% respectivamente.

La clarificación es el proceso mediante el cual se separa y purifica el aceite de la mezcla líquida extraída en las prensas, la cual contiene aceite, agua, lodos livianos (compuestos por pectinas y gomas) y lodos pesados (compuestos por tierra, arena y otras impurezas). De la clarificación se obtiene una corriente de lodos que se somete a un tratamiento de residuos y una corriente de aceite con la siguiente composición promedio:

<b>ACIDEZ</b>	<b>HUMEDAD</b>	<b>IMPUREZAS</b>
<b>2.5 - 3.5%</b>	<b>Máximo 0.3%</b>	<b>Máximo 0.03%</b>

En el anexo A se presenta el diagrama de flujo general de la Extractora Central S.A. correspondiente a la extracción y clarificación.

## **1.2 RECUPERACIÓN DE LA ALMENDRA: PALMISTERÍA**

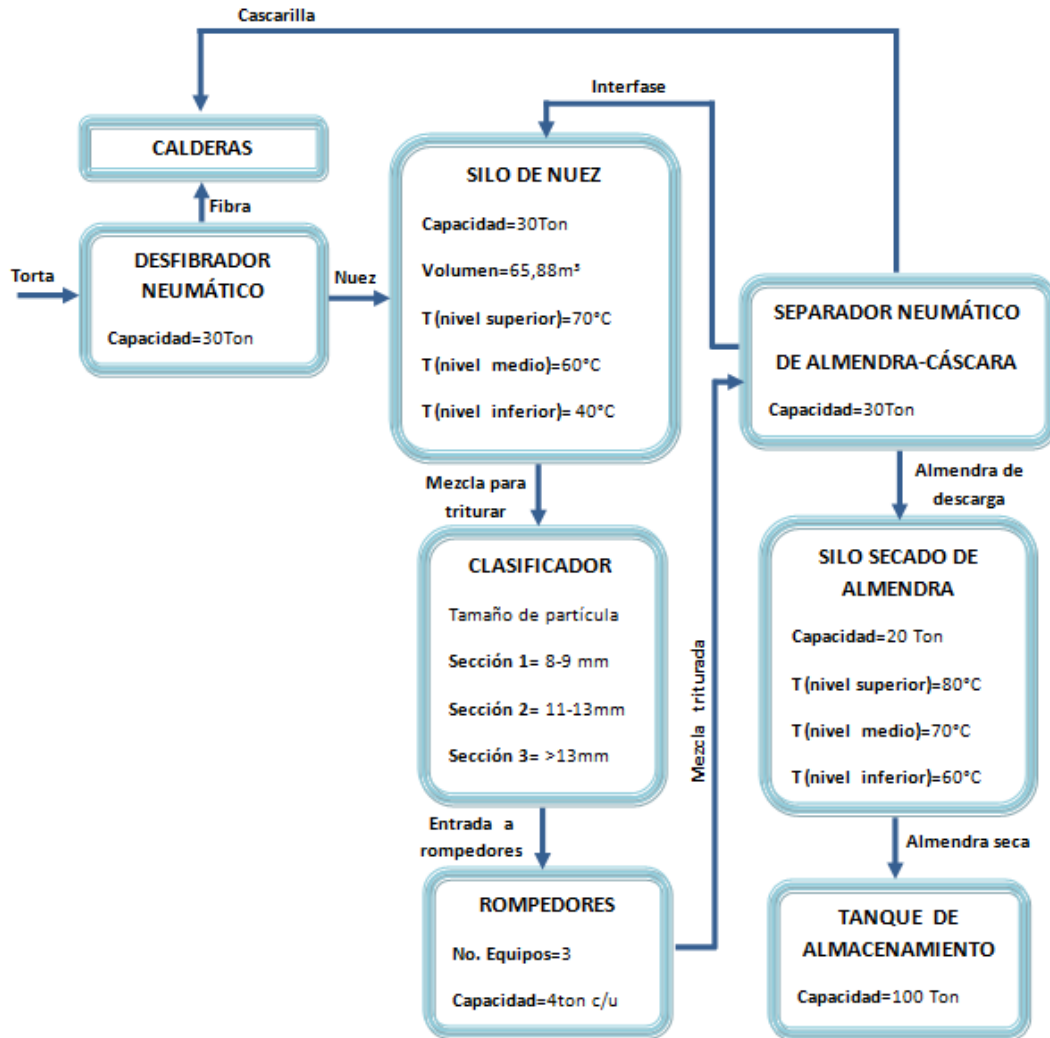
Como se muestra en la figura 1, en la sección de palmistería se implementa el mecanismo de separación neumática, cuyo principio fundamental es la diferencia existente entre la velocidad de arrastre o sustentación de los componentes de una mezcla en un flujo de aire; velocidad que depende principalmente del peso, tamaño y forma de las partículas (DURÁN, 2001).

Este principio se aplica en el desfibrador y en la columna de separación de almendras y cascarilla. En el primero se procesa la torta proveniente de las prensas con una corriente de aire que arrastra desde partículas muy finas de fibra, hasta partículas medianas de cuesco, mientras se descargan las nueces hacia un proceso de trituración en rompedores de tipo mordaza o ripple mil. Del rompimiento, se obtiene una corriente triturada que se alimenta a la columna de separación almendra-cáscara.

En la separación neumática de almendra-cáscara, tanto el mecanismo como su operación, es muy similar al del separador de fibra y nuez, con la diferencia de que su estructura está dividida en dos secciones como se muestra en la figura 2: una primera sección que opera a velocidades cercanas a 15m/s y otra superior y en serie, que opera a velocidades cercanas a 12m/s.

**Figura 1.** Diagrama de proceso de la sección de palmistería en la Extractora Central S.A.

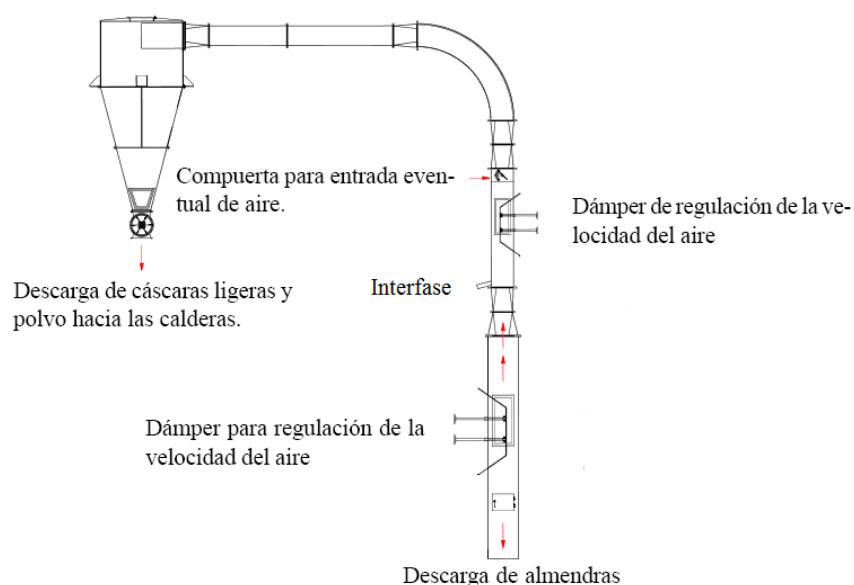
**Fuente.** El autor



De la tabla 1, se puede deducir que, en la primera sección se logra arrastrar la mayor cantidad de cascarilla, sin embargo al superar los 14m/s también acarrearía algunas almendras pequeñas o rotas. Cuando esta corriente entra a la segunda sección, donde se reduce la velocidad hasta 12m/s, se recuperan las almendras en una descarga intermedia.

Esta descarga intermedia se denominada interfase, y está formada por la mezcla de almendras, nueces pequeñas y cáscaras de tamaño grande procedentes de la segunda sección de la columna. En el caso de la Extractora Central S.A., este flujo se recircula al silo de nuez (ver figura 1). Sin embargo, es usual encontrar un

sistema acoplado a la columna con el fin de procesar la corriente de interfase y recuperar las almendras allí contenidas. Para éste fin se han diseñado algunos arreglos, entre los que se destaca la instalación de otra columna o de sistemas hidrodinámicos como los hidrociclones o el separador de baño de arcilla.



**Figura 2.** Columna neumática de separación almendra-cáscara.

**Fuente.** WAMBECK, Nöel. 2005

PARTICULA	VELOCIDAD, m / s.
Fibra fina.	Inferior a 2.
Fibra seca normal.	4.
Fibra húmeda.	6.
Cuesco. Partículas pequeñas.	10.
Cuesco. Partículas medianas.	12 – 14.
Almendra partículas pequeñas.	14.
Nueces pequeñas.	16.
Cuesco. Partículas grandes.	16.
Almendras medianas.	18.
Nueces medianas.	20 – 24.
Almendras grandes.	20.
Nueces grandes.	24 – 28.

**Tabla 1.** Velocidad de arrastre para diferentes partículas en una corriente de aire.

**Fuente.** LEÓN BERMÚDEZ, Adan yovani. 2004

Por otro lado, la almendra recuperada se almacena en un silo de secado, para reducir su humedad hasta 6-7% y finalmente llevarla al silo de almacenamiento, mientras que el cuesco se separa y se dispone en un silo, para ser posteriormente utilizado como combustible en calderas y/o comercializado, al igual que la fibra proveniente del desfibrador neumático.

### **1.3 ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS EN LA SEPARACIÓN DE ALMENDRAS Y CÁSCARAS**

En general, los métodos de separación se pueden clasificar en dos tipos: los métodos de separación por vía húmeda (hidrociclones, clay bath o baño de arcilla) y los métodos por vía seca (columnas neumáticas, mesa gravimétrica).

#### **1.3.1 Métodos de separación por vía húmeda**

Los métodos de separación por vía húmeda que guardan vigencia en la industria colombiana de la palma africana son el separador de baño de arcilla y el hidrociclón. El primero, es un método de sumersión-flotación para sólidos de diferente gravedad específica, que utiliza lechadas densas las cuales permiten suspender los sólidos de menor gravedad y sumergir los de mayor gravedad específica (CEPEDA, 1980). El líquido denso se obtiene adicionando arcilla hasta tener una densidad de (1,06-1,09 g/ml) para las almendras y de (1,25-1,35 g/ml) para las cáscaras y nueces. Su capacidad de procesamiento está alrededor de 3-5Ton/h y un requerimiento de potencia eléctrica total de 4 Kw aproximadamente.

En cuanto al hidrociclón, este permite separar un material disperso en un líquido por medio de la acción centrífuga. Representa un porcentaje de participación significativo en la industria colombiana, con buenos rendimientos alrededor del 95 - 99% en la separación de almendra y del 93-97% para remoción de cuesco, aunque con la desventaja de exhibir mayores requerimientos de energía y elevados costos de mantenimiento comparado con otros métodos equivalentes.

Es importante resaltar que los métodos por vía húmeda, demandan grandes cantidades de agua. De acuerdo a lo estimado por CEPEDA y PEDRAZA (1980) en su estudio sobre el diseño de hidrociclones, se obtuvo una relación de 1:24 entre la masa de sólidos totales y la masa de agua. Además se debe considerar el posterior acondicionamiento del material húmedo.

### **1.3.2 Métodos de separación por vía seca**

El mecanismo más utilizado en las plantas extractoras colombianas es la separación neumática, no obstante, se pretende mostrar otras alternativas enfocadas especialmente al tratamiento de la corriente de interfase derivada de las columnas neumáticas.

En el diseño de equipos agroindustriales para la separación de sólidos como granos, nueces y semillas se han diseñado mecanismos basados en tres propiedades fundamentales: tamaño, forma y gravedad específica (HENDERSON, 1976).

Los clasificadores que utilizan la diferencia de tamaño como criterio de diseño, a pesar de su amplio uso en otras industrias, no son aplicables para la mezcla almendra-cáscara, cuyos tamaños no difieren sustancialmente. Resultan más apropiados los mecanismos cuyo fundamento es la diferencia en la forma de las partículas (AKUBUO, 2002), así como los que se basan en la diferencia de gravedad específica.

AKUBUO y EJE (2002); presentan el diseño de un equipo formado por una bandeja con dos secciones de diferente construcción, que cuenta con un sistema que le proporciona un movimiento vibratorio (ver anexo B). Los resultados de este diseño son: pureza de almendra de 82%, pureza de cáscaras de 95.2% y eficiencia de separación de 82.1%<sup>2</sup>, pero con una capacidad de procesamiento baja de 446 kg/h.

---

<sup>2</sup> La eficiencia de separación Y, es calculada como una combinación de las eficiencias individuales.  $Y=100 K_r.S_r$ , donde  $K_r$  es la recuperación de almendras y  $S_r$  es la recuperación de cáscaras.

Basados en la diferencia de las propiedades físicas como la forma y coeficientes de fricción, Koya y Faborode (2006) construyeron el disco giratorio mostrado en la figura 9 del anexo B; encontrando que la diferencia entre los ángulos de descarga de almendras, cáscaras y mezcla sin separar; es un principio aplicable en el diseño de un separador de palmiste. Sin embargo, no presentan resultados cuantitativos de rendimiento ni capacidad de procesamiento.

### 1.3.3 El separador gravimétrico o mesa densimétrica

El separador gravimétrico se compone de una mesa rectangular inclinada y levantada sobre una base sólida, incluye un ventilador que distribuye aire a cinco secciones a lo largo del eje horizontal de la mesa y un sistema de poleas, con el cual se induce un movimiento de oscilación en el sistema.

En la parte superior de la mesa gravimétrica se dispone de una malla provista de pequeños canales que facilitan el desplazamiento de las partículas a lo largo de la superficie y en el extremo de descarga, se cuenta con tres barras o guías móviles con el fin de regular el flujo para cada una de las fases obtenidas (figura 3).



**Figura 3.** Vista superior del equipo de separación gravimétrico.

**Fuente.** El autor

Adicionalmente, es posible hacer variaciones en los ángulos de inclinación lateral y longitudinal de la superficie, en la velocidad de rotación-oscilación y además, regular el caudal y por tanto la velocidad de aire en cada segmento.

### 1.3.3.1 Antecedentes de la mesa gravimétrica

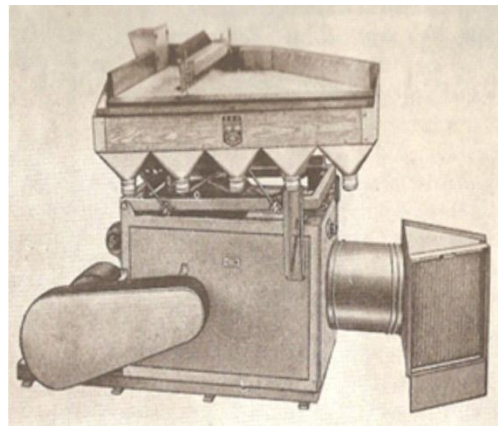
Inicialmente los separadores de gravedad específica o mesas gravimétricas, fueron aplicados en la industria de los minerales. Ya en los años 60's se publicaron los primeros avances de su aplicación en la limpieza y manipulación de granos, nueces y semillas. En las figuras 4(a) y 4(b) se pueden ver los primeros ejemplares del separador gravimétrico. Su unidad principal, es una mesa de forma triangular inclinada y con perforaciones, de tal forma que el aire alimentado a través de ella es distribuido uniformemente.

HARMOND, J. E., et al. (1961), establecieron que las principales variables de operación que determinan resultados específicos en el comportamiento de una mezcla en el separador gravimétrico son:

- Flujo másico de alimentación
- Flujo de aire
- Inclinación longitudinal de la mesa
- Inclinación del borde de descarga o inclinación lateral
- Velocidad de rotación-oscilación.



(a)



(b)

**Figura 4.** (a) Separador gravimétrico de semillas de trébol y geranio. **Fuente.** HARMOND, J. E., et al. 1961; (b) Separador por gravedad específica de granos, nueces y semillas. **Fuente.** HENDERSON & PERRY. 1976.

### 1.3.3.2 Principio de operación

La operación consiste en estratificar las partículas en capas de diferente densidad o gravedad específica a través del uso de aire, y separar las capas por una

combinación entre el movimiento de oscilación y la respectiva inclinación de la mesa.

Como lo define claramente HARMOND, J. E., et al. 1961:

El aire causa que el material se estratifique en capas de diferentes densidades de la misma manera como el agua estratifica corcho molido y arena. El corcho flota en la superficie del agua, y la arena forma una capa en el fondo. En el aire, el material ligero flota y el pesado está en contacto con la mesa. El movimiento oscilante de la mesa conduce el material pesado cuesta arriba casi paralelamente al borde de descarga, y el aire hace flotar el material ligero cuesta abajo.

## **2. DESARROLLO EXPERIMENTAL**

Posteriormente al reconocimiento mecánico y operativo del equipo, continúan dos etapas fundamentales: la caracterización del sistema actual y evaluación operativa del separador gravimétrico.

### **2.1 CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA ACTUAL**

Se caracterizó el sistema por medio de un balance de masa promedio en la sección de palmistería, según el diagrama de flujo mostrado en la figura 5. Los flujos máxicos se evaluaron recogiendo y pesando una cantidad de material durante un tiempo de 10 min y las composiciones se determinaron tomando muestras de 300 g en cada corriente, que posteriormente fueron separadas en los diferentes componentes allí presentes:

**AE:** Almendra entera

**AR:** Almendra rota

**Aad:** Almendra adherida

**NE:** Nuez entera

**C:** Cascarilla o cuesco

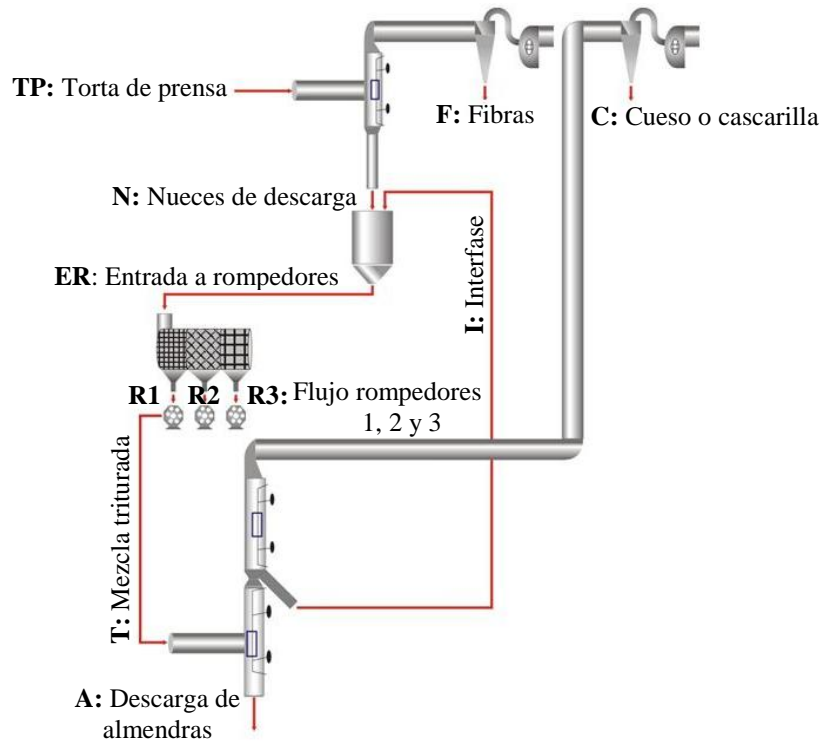
**F:** Fibra

**CyF:** Cáscara y fibra

**At:** Almendra total: entera y rota

Algunos flujos y composiciones se midieron directamente, mientras que otros se estimaron por medio de cálculos estequiométricos. Para fines pertinentes, se

utilizaron indicadores de proceso determinados por la planta extractora, que se consideraron constantes a través de los diferentes días de medición.



**Figura 5.** Diagrama de flujo de la sección de palmistería.

**Fuente.** El autor

Con base en los balances, se calculó la eficiencia real y potencial de recuperación de almendra por medio de las ecuaciones 1 y 2 respectivamente.

$$ERc = \frac{At_A}{At_T} * 100 \quad (1)$$

$$EPc = \frac{At_A + At_I}{At_T} * 100 \quad (2)$$

**ERc:** Eficiencia real en la columna (%)

**EPc:** Eficiencia potencial en la columna

**At<sub>A</sub>:** Almendra total en la descarga (Kg/h)

(%)

**At<sub>T</sub>:** Almendra total en la mezcla triturada (Kg/h)

**At<sub>I</sub>:** Almendra total en la interfase (Kg/h)

Adicionalmente a los balances de masa, se evaluó el consumo energético del sistema actual. Se midió la corriente consumida en operación para los equipos principales en la sección de palmistería de la Extractora Central S.A. (ver anexo C), se calculó la potencia aparente como el producto de la corriente por el voltaje y el total de energía consumida, como la suma de las potencias individuales.

## 2.2 EXPLORACIÓN Y PLANEACIÓN DE ENSAYOS PARA LA EVALUACIÓN OPERATIVA DEL SEPARADOR TIPO MESA GRAVIMÉTRICA

Aprovechando el montaje de la mesa gravimétrica en la Extractora del Sur de Casanare y teniendo en cuenta la similitud en las características de los flujos másicos a procesar en el separador, se planearon una serie de ensayos que fueron ejecutados en dicha planta de beneficio, con el propósito de aplicar los resultados obtenidos en el estudio de factibilidad para el montaje del separador gravimétrico en la Extractora Central S.A.

A partir de ensayos exploratorios, se identificaron como variables fundamentales para iniciar el estudio de evaluación operativa; la velocidad de rotación del equipo y los ángulos de inclinación tanto lateral como longitudinal, manteniendo fija la apertura de dámper en los ventiladores, la posición de las guías en la descarga, entre otros. Además, se determinó el rango de estudio para cada variable, tomando valores mínimo, medio y superior como lo indica la tabla 2.

**Tabla 2.** Rango de niveles seleccionados para la evaluación operativa de la mesa gravimétrica.

<b>NIVELES DE ESTUDIO PARA LA EVALUACIÓN DE ENSAYOS</b>			
<b>Niveles</b>	<b>Inclinación</b>		<b>Velocidad</b>
	<b>Lateral (grados °)</b>	<b>Longitudinal (grados °)</b>	<b>(rpm)</b>
<b>Inferior</b>	3,71	1,97	365,9
<b>Medio</b>	4,24	2,28	397,8
<b>Superior</b>	4,76	2,59	409,0

Se formuló un diseño experimental completamente al azar con estructura factorial (ver tabla 3), cuyos factores son la velocidad de rotación, ángulo de inclinación longitudinal y ángulo de inclinación lateral y los niveles descritos en la tabla 2. Con lo anterior se generan 27 tratamientos, cada uno con 3 repeticiones, para un total de 81 ensayos mostrados en la tabla 11 del anexo D.

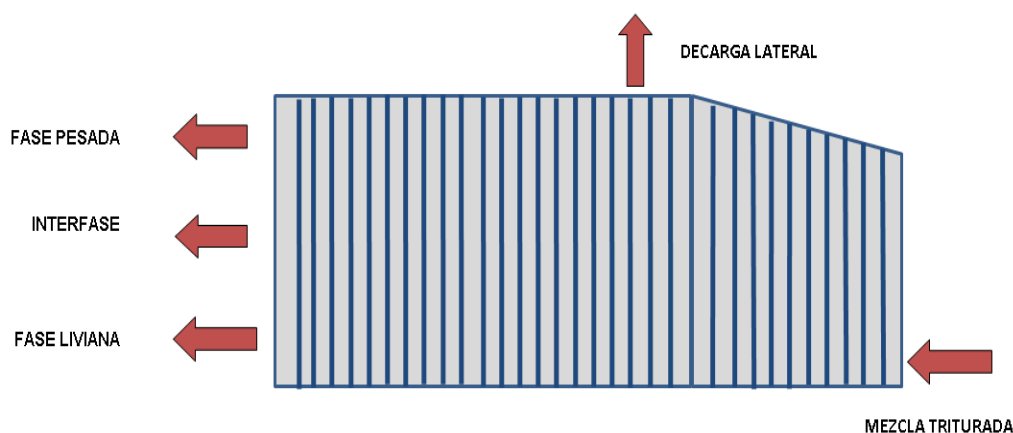
**Tabla 3.** Diseño de experimento completamente al azar con estructura factorial.

Factores	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
VR	V1 (rpm)	V2 (rpm)	V3 (rpm)
ALON	Alon-1	Alon-2	Alon-3
ALAT	Alat-1	Alat-2	Alat-3

VR: Velocidad de Rotación (rpm), ALON: Ángulo de inclinación longitudinal  
ALAT: Ángulo de inclinación lateral

Para la medición de las variables respuesta se estableció el esquema de la figura 6, en el cual se identifican las principales corrientes de entrada y salida del equipo gravimétrico. Entre las variables respuesta y seguimiento a los ensayos se tienen:

- Eficiencia real y potencial de recuperación de almendra (Ecuación 3 y 4)
- Eficiencia de recuperación de cáscara (Ecuación 5)
- % de impurezas en la fase de recuperación de almendras.
- % de pérdidas de almendra en la fase de separación de cáscaras.



**Figura 6.** Esquema de corrientes de entrada y salida del equipo de separación gravimétrica.

$$ERm = \frac{FAs}{FAe} \cdot 100 \quad (3)$$

$$EPm = \frac{FAs}{FAe+FAI} \cdot 100 \quad (4)$$

**ERm:** Eficiencia real de recuperación de almendra en la mesa gravimétrica (%)

**FAs:** Flujo másico de almendras en la fase pesada (kg/h)

**FAe:** Flujo másico de almendra a la entrada de la mesa (kg/h)

**EPm:** Eficiencia potencial de recuperación de almendra en la mesa gravimétrica (%)

**FAI:** Flujo másico de almendra en la interfase de la mesa (Kg/h)

$$ECm = \frac{FCs}{FCe} \cdot 100 \quad (5)$$

**ECm:** Eficiencia de recuperación de cáscaras en la mesa gravimétrica (%)

**FCs:** Flujo másico de cáscaras en la fase liviana (kg/h)

**FCe:** Flujo másico de cáscaras a la entrada de la mesa (kg/h)

### 2.3 EVALUACIÓN DE INGRESOS EN LA EXTRACTORA CENTRAL S.A.

Con base en la ecuación 6 se estimaron los ingresos tanto para el sistema tradicional de recuperación de almendra como para el sistema modificado (con la mesa gravimétrica incorporada). En cuanto a las impurezas, la Extractora Central ha establecido un valor crítico alrededor de 13%, de modo que, se bonificará en una proporción sobre las toneladas de almendra vendidas equivalente a los puntos porcentuales por debajo de este valor crítico. Caso contrario ocurriría, en iguales proporciones, cuando el nivel de impurezas exceda este valor.

$$IT = I_A \pm F_I - E_p \quad (6)$$

**IT:** Ingreso total (\$/año)

**I<sub>A</sub>:** Ingreso por venta de almendra (\$/año)

**F<sub>I</sub>:** Ingreso o egreso por concepto de bonificación o castigo (\$/año)

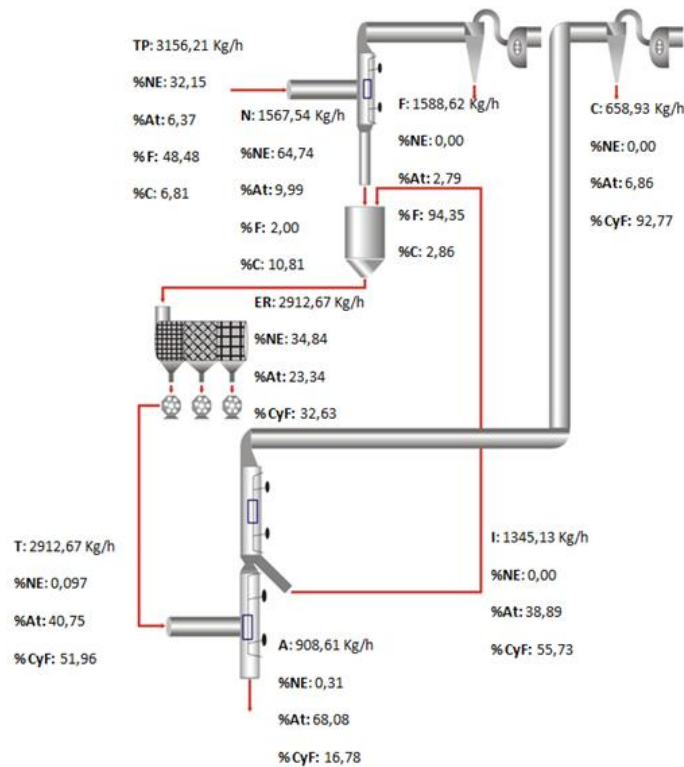
**E<sub>p</sub>:** Egreso por pérdida de almendra en cascarilla (\$/año)

### 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En el presente capítulo se presentan los resultados obtenidos de la caracterización del sistema actual, la evaluación operativa del equipo gravimétrico y finalmente los parámetros de eficiencia y calidad, consumos energéticos y costos anuales involucrados en la operación de la mesa gravimétrica en la Extractora Central.

#### 3.1 RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DEL SISTEMA ACTUAL

Los balances de masa se plantearon alrededor de tres equipos: el desfibrador neumático, los rompedores y la columna de separación almendra-cáscara. Se seleccionaron los balances representativos y se calculó el promedio mostrado en la figura 7. Se puede destacar la alta variabilidad en los flujos másicos evaluados en la columna almendra-cáscara, dado que no se cuenta con un mecanismo adecuado de dosificación de nueces a los rompedores.



**Figura 7.** Balance de masa promedio en la sección de palmistería

Sin embargo, se pudo observar que en la mayoría de los balances se mantienen las proporciones en la distribución de triturado, por tanto, de la mezcla alimentada a la columna, aproximadamente un 24,29% corresponde a la almendra de descarga, 25,74% es transportado por el ducto de cascarilla y un 49,97% equivale a la corriente de interfase. El porcentaje de impurezas permanece en un rango de 8 a 13% y las pérdidas de 4 a 9%. Estos valores dependen esencialmente del ajuste de la velocidad de aire en la columna.

Del balance en los rompedores, se deben evaluar dos criterios importantes que son la eficiencia, calculada con la ecuación 7, y la rotura de almendra que es la diferencia entre la almendra rota a la salida y a la entrada (ver tabla 4).

$$E_f = \frac{[(NE + Aad)_{entrada} - (NE + Aad)_{salida}] * 100}{(NE + Aad)_{entrada}} \quad (7)$$

**Ef:** Eficiencia de rompimiento del triturador

**NE:** Flujo másico de nuez entera (Kg/h)

**Aad:** Flujo másico de almendra adherida (Kg/h)

Comúnmente la eficiencia en estos equipos es cercana al 92% y depende ya sea del desgaste de rodillos o mordazas o del ajuste de las aperturas de alimentación y el sistema de engranajes, evitando la rotura de la almendra. De acuerdo con esto, es posible que el rompedor 1 y 2 necesiten reponer o cambiar algunas partes desgastadas, de lo contrario, es recomendable un ajuste, especialmente en el rompedor 2. Por otro lado, el rompedor 3, presenta resultados positivos.

Rompedor	Eficiencia (%)	Rotura de almendra (%)
1	77,52	5
2	77,46	0,06
3	91,02	13,06

**Tabla 4.** Indicadores de eficiencia de rompedores

Se puede apreciar en la tabla 5 que existe un alto potencial de recuperación de almendra en la corriente de interfase, dado que la eficiencia real es bastante menor que la eficiencia potencial de la columna neumática. Con todo esto, se demuestra la necesidad del montaje y puesta en marcha de una segunda fase de recuperación de almendra, bien sea por vía húmeda (hidrociclones) o por vía seca (caso particular de la mesa gravimétrica) en aras de disminuir el porcentaje de recirculación de almendra y cáscaras contenidas en la corriente de interfase.

**Tabla 5.** Indicadores para el sistema actual de recuperación de almendra en la Extractora Central S.A.

<b>Indicadores – Columna neumática de separación cuesco-almendra</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
<b>Eficiencia real de recuperación de almendra</b>	58,7	%
<b>Eficiencia potencial de recuperación de almendra</b>	95,9	%
<b>Pérdida de almendra (sobre la muestra)</b>	6,86	%
<sup>1</sup> <b>Pérdida de almendra total</b>	0,25	% Alm/Ton RFF
<b>Impurezas</b>	16,78	%
<b>Eficiencia de separación de cáscaras</b>	40,4	%
<sup>2</sup> <b>Almendra recirculada</b>	44,1	%

<sup>1</sup> Calculado con base en la capacidad de procesamiento de la planta extractora 18 Ton/h.

<sup>2</sup> Porcentaje de almendra recirculada con relación al total de almendra alimentada a la columna.

## **3.2 RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN OPERATIVA DEL SEPARADOR GRAVIMÉTRICO**

### **3.2.1 Condiciones de operación adecuadas para la mesa gravimétrica**

Después del análisis estadístico entre tratamientos y grupos homogéneos presentado en el anexo D, se proponen los mejores tratamientos en términos de mayor eficiencia de recuperación de almendra, mayor separación de cáscaras y bajos niveles tanto de impurezas como de pérdida de almendra. En este orden de ideas, los ensayos que mejor cumplen con las condiciones mencionadas

anteriormente corresponden a los tratamientos 1, 2 y 10 tal y como se indica en la tabla 6. Igualmente, se observa las respectivas condiciones de operación para cada tratamiento seleccionado.

**Tabla 6.** Tratamientos con los mayores rendimientos de recuperación de almendra y bajos niveles de pérdidas de almendra e impurezas.

Trat.	ER	EP	EC	IMP	PER	A-Lon	A-Lat	Vel
T1	<b>48,9</b>	76,9	69,6	19	17	1,97	3,71	415,9
T2	39,4	<b>84,9</b>	72,5	17,7	<b>10,2</b>	2,28	3,71	415,9
T10	41,9	70,3	<b>84,5</b>	<b>9,8</b>	18,2	1,97	3,71	403,4

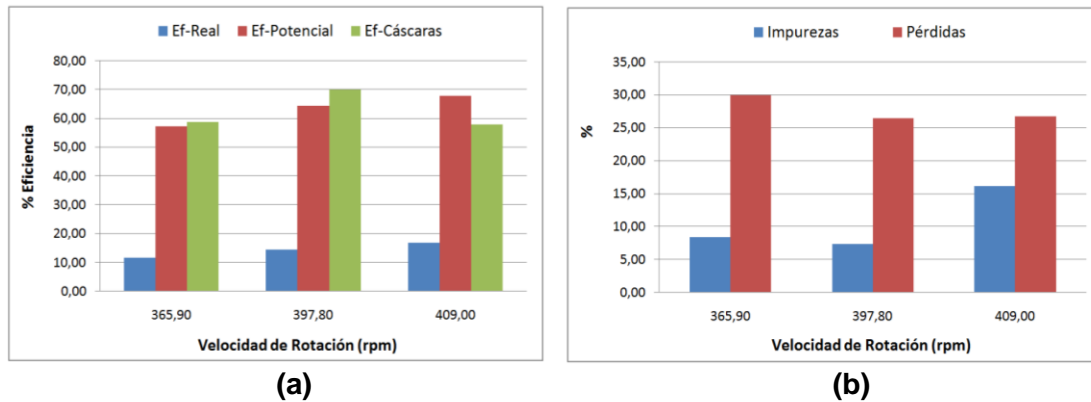
ER: Eficiencia real, EP: Eficiencia potencial; EC: Eficiencia de cáscaras; IMP: Impurezas; PER: pérdidas; A-Lon: Ángulo de inclinación longitudinal; A-Lat: Ángulo de inclinación lateral; Vel: Velocidad de Rotación (rpm).

No obstante, se observa en la tabla 6 que ninguno de los tratamientos seleccionados presenta una tendencia simultánea de mayores eficiencias y parámetros de calidad mínimos (porcentajes bajos de pérdidas e impurezas), por tal razón y en aras de optimizar las condiciones adecuadas de operación para la mesa gravimétrica, fue necesario aplicar un análisis multivarido (ver anexo D) del cual se pudo concluir que las condiciones de operación adecuadas de la mesa gravimétrica corresponden a aquellas que sigan la tendencia de mantener altas velocidades de rotación-oscilación (acelera la estratificación de la mezcla triturada, generando las diversas fases) y mínimos ángulos de inclinación lateral y longitudinal (aumentan el tiempo de residencia de las partículas para una mejor separación). Asimismo, y siguiendo esta tendencia de las variables de operación para el sistema en estudio, se obtienen también condiciones de operación que conducen a una función positiva en cuanto a ingresos económicos se refiere.

### 3.2.2 Efecto de los factores de estudio sobre las variables respuesta

De antemano, es importante aclarar que los valores de las variables respuesta, corresponden a un promedio de todos los ensayos evaluados.

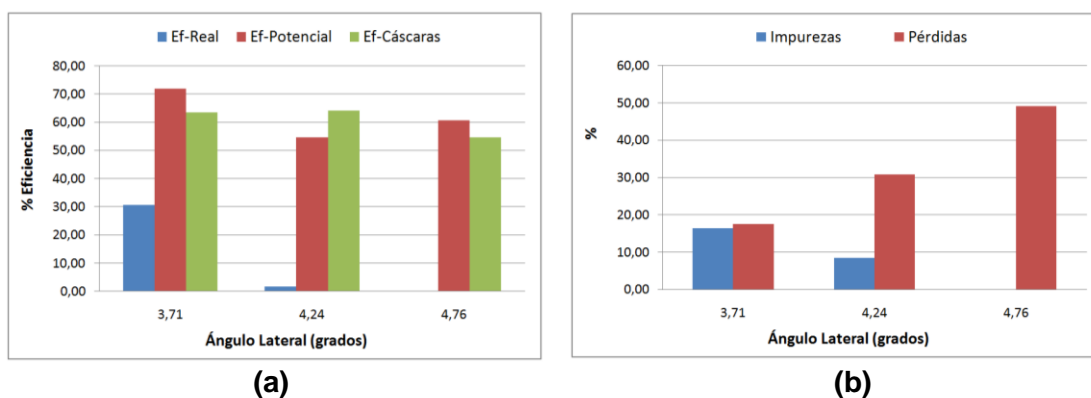
En la gráfica 1(a) se puede observar un efecto positivo del incremento de la velocidad de rotación sobre la eficiencia real y potencial de recuperación de almendras.



**Gráfica 1.** Efecto de la velocidad de rotación (a) sobre la eficiencia ER, EP, EC y (b) sobre el porcentaje de pérdidas de almendra (PER) e impurezas (IMP).

Por otro lado, la gráfica 1(b) permite observar la incidencia de la velocidad de rotación sobre los indicadores de calidad, encontrando que para el nivel medio de velocidad se presentan los menores porcentajes de pérdida e impurezas.

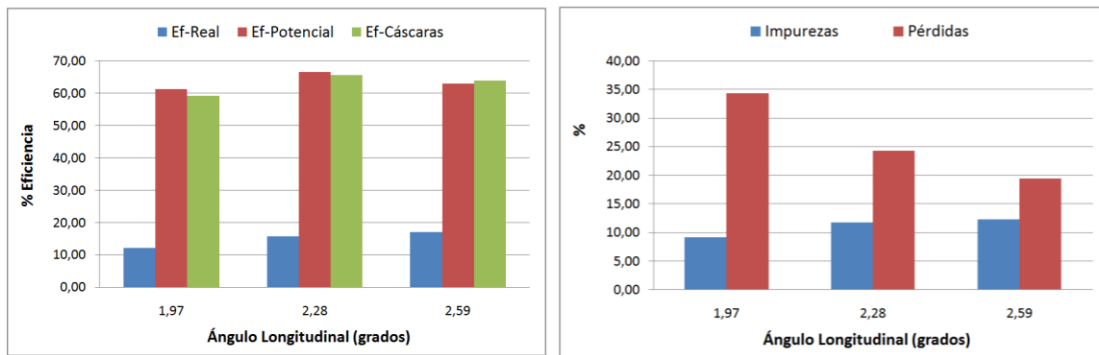
Asimismo, en la gráfica 2(a) se puede apreciar el efecto desfavorable del aumento en la inclinación lateral sobre la eficiencia real y potencial de recuperación de almendra, al igual que sobre la separación de cáscaras.



**Gráfica 2.** Efecto de la inclinación lateral (a) sobre la eficiencia ER, EP, EC y (b) sobre el porcentaje de pérdidas de almendra (PER) e impurezas (IMP).

En cuanto a los parámetros de calidad (pérdidas e impurezas), se puede apreciar (gráfica 2(b)) que el único efecto positivo del incremento en la inclinación lateral se presenta sobre la reducción de impurezas. Sin embargo, tanto las pérdidas e impurezas son susceptibles de mejorar con la manipulación adecuada de las guías de descarga.

En la gráfica 3 se observa el comportamiento de las variables respuesta con relación al ángulo de inclinación longitudinal, se puede apreciar que el aumento de la inclinación longitudinal, en términos generales no presenta mayor incidencia en las eficiencias de recuperación de almendra real y potencial (gráfica 3(a)). En la gráfica 3(b) se interpreta que, a mayores ángulos de inclinación longitudinal, mayores son los niveles de impurezas y menores pérdidas en cáscaras.



**Gráfica 3.** Efecto de la inclinación longitudinal (a) sobre la eficiencia ER, EP y EC y (b) sobre el porcentaje de pérdidas de almendra (PER) e impurezas (IMP).

### 3.3 IMPLICACIONES EN EL MONTAJE DEL SEPARADOR GRAVIMÉTRICO PARA LA EXTRACTORA CENTRAL S.A.

Partimos de un análisis comparativo entre las dos extractoras respecto a las condiciones de la corriente de alimentación al separador gravimétrico (Tabla 7), demostrando la similitud entre los sistemas.

**Tabla 7.** Comparación entre las corrientes de alimento a la mesa gravimétrica para la extractora sur del Casanare y la extractora Central.

Corriente de alimento a la mesa gravimétrica	Interfase columna Extractora Sur del Casanare	Interfase columna Extractora Central
Flujo másico(Kg/h)	831,0	* 723,89
AT (%)	48,8	38,89
CA (%)	46,9	55,73
AD (%)	4,3	5,37

\* Este flujo másico se calcula eliminando la recirculación de la interfase al sistema y ajustándolo a un nuevo valor equivalente al 46,18 % del flujo de alimentación a la columna cuesco-almendra.

### 3.3.1 Eficiencia y parámetros de calidad en los sistemas de recuperación de almendra para la Extractora Central S.A

La tabla 8 muestra las eficiencias de recuperación de almendra y parámetros de calidad (pérdidas e impurezas) para el sistema tradicional de recuperación de almendra y la mesa gravimétrica en funcionamiento como equipo individual e integrado en el sistema actual dispuesto en la Extractora Central. La columna neumática presenta una eficiencia baja de recuperación de almendras, mientras que con la participación de la mesa gravimétrica en el sistema global de recuperación de almendra podría alcanzarse una eficiencia alrededor de 69,33%.

**Tabla 8.** Eficiencias reales de recuperación de almendra en diferentes configuraciones para la Extractora Central.

Configuraciones Recuperación de Almendra	Eficiencia (%)	Pérdidas (%)	Impurezas (%)
Columna neumática	58,7	6,86	16,78
* Mesa gravimétrica	48,9	17,0	19,0
Columna neumática + Mesa Gravimétrica	69,3	9,77	17,4

\* Las condiciones de la mesa gravimétrica corresponden al mejor tratamiento obtenido en la Extractora del Sur de Casanare en términos de recuperación de almendra (ver tabla 6)

De este modo y con base en la eficiencia de recuperación de almendra alcanzada, se puede afirmar que la mesa gravimétrica representa una alternativa favorable para el procesamiento de la corriente de interfase en la columna neumática, sin embargo es necesario evaluar los parámetros de calidad (pérdidas e impurezas) y consumos energéticos en términos de ingresos y egresos económicos respectivamente en aras de soportar tal afirmación.

### 3.3.2 Consumo energético en la sección de palmistería en la extractora central S.A.

En la tabla 9 se puede observar que la puesta en marcha de la mesa gravimétrica representaría un consumo adicional de energía en la sección de palmistería. No obstante, la demanda energética de la mesa gravimétrica es 3 veces menor que otros sistemas como es el caso del hidrociclón, asimismo los costos por mantenimiento en el separador gravimétrico son bastante menores comparados con el sistema de separación hidrodinámica.

**Tabla 9.** Consumo energético para los sistemas de recuperación de almendra de la Extractora Central

INDICADORES DE CONSUMO Y COSTOS	SISTEMA TRADICIONAL	MESA GRAVIMÉTRICA	SISTEMA INTEGRADO
Potencia Eléctrica Requerida (kW)	88,21	5,7	93,91
<sup>1</sup> Consumo Energético Anual (MW-h)	485,13	31,4	516,54
<sup>2</sup> Costo Energético Anual (millones \$)	144,59	9,3	153,9

<sup>1</sup> Horas de proceso anuales: 5500

<sup>2</sup> Costo del kW-h generado en la planta Extractora Central: \$ 296

### 3.3.3 Evaluación de ingresos por recuperación de almendra y calidad en la extractora central S.A.

En la tabla 10 se observa los ingresos totales por recuperación de almendra, pérdida y calidad. Estos ingresos corresponden a los estimados para el año 2008 a partir de un volumen de fruta procesada equivalente a 99000 ton RFF para el mismo año en la planta Extractora Central. Asimismo, la tabla 10 compara los

ingresos totales obtenidos bajo la operación del sistema tradicional de recuperación de almendras (columna neumática) con los generados por la mesa gravimétrica y el sistema integrado (columna-mesa).

**Tabla 10.** Comparación de ingresos anuales (estimados para el año 2008) por recuperación de almendra, pérdida y calidad en diferentes configuraciones.

<b>Indicadores</b>	<b>Sistema Tradicional</b>	<b>Mesa Gravimétrica</b>	<b>Sistema Integrado</b>
Almendra recuperada (%Alm/RFF)	1,85	0,83	2,68
* Ingresos almendra (millones \$)	3288,6	594,7	3883,3
Pérdida de almendra (%Alm/RFF)	0,25	0,25	0,39
* Egresos almendra (millones \$)	- 195,4	- 194,6	- 389,8
Impurezas (%)	16,78	19,0	17,4
* Bonificación-Castigo (millones \$)	- 197,3	-35,7	- 233,0
<b>TOTAL INGRESOS (millones \$)</b>	<b>2895,9</b>	<b>364,5</b>	<b>3269,4</b>

\* Calculados a partir de un volumen de fruta procesada en la Extractora Central equivalente a 99000 ton RFF durante el año 2008.

\* El precio del kilogramo de almendra para fines pertinentes corresponde a 785,4 \$ /kg de Alm.

De igual modo, se puede apreciar que el sistema tradicional presenta un ingreso total de 2895,9 millones \$/año, mientras que el sistema integrado (inclusión de la mesa gravimétrica al sistema tradicional) presenta un ingreso total de 3269,4 millones \$/año correspondiente a un incremento de 13%. No obstante, el sistema integrado presenta mayores egresos por castigo de almendra y pérdidas, dado que el porcentaje de pérdidas e impurezas alcanzadas con el sistema integrado son ligeramente superiores a las encontradas en la columna neumática.

#### 4. CONCLUSIONES

- De acuerdo al análisis estadístico, se observó una tendencia al incremento de la eficiencia real y potencial de recuperación tanto de almendras y cáscaras en la medida en que se aumenta la velocidad de rotación y el ángulo longitudinal, caso contrario sucede cuando se incrementa el ángulo de inclinación lateral.
- Con respecto a los parámetros de calidad, se observó que las pérdidas de almendra al igual que la eficiencia, se favorecen (niveles bajos de pérdida) con el incremento en la velocidad de rotación y del ángulo de inclinación longitudinal, situación adversa ocurre con las impurezas.
- Se establecieron las condiciones de operación adecuadas para la mesa gravimétrica de acuerdo a los resultados obtenidos en los mejores tratamientos (1, 2 y 10) en términos de mayores eficiencias de recuperación real y potencial de almendra y bajos porcentajes de pérdidas de almendra e impureza (Tabla 6).
- Se determinó que la operación adecuada de la mesa gravimétrica responde al rango de velocidades de rotación entre 400 y 420 rpm (niveles superiores), con una inclinación lateral mínima que oscila entre  $3,18 - 3,71^\circ$  y un ángulo de inclinación longitudinal mínimo que puede variar entre  $1,46 - 2,28^\circ$ .

#### BIBLIOGRAFÍA

- **WAMBECK, Noël.** Sinopsis del proceso de la palma de aceite. Traducida, dirigida y actualizada para el contexto latinoamericano por Bernal, Guillermo; Cala, Germán. Fedepalma, edición en español. 2005.
- **HERNÁNDEZ, Alexander.** Estudio Técnico de las Variables de Proceso en el Prensado, Desfibrado y Sedimentación de una Planta de Beneficio de Aceite de

Palma. Tesis de grado (ingeniero químico). Universidad industrial de Santander. Bucaramanga. 2005.

- **LEÓN BERMUDEZ, Adan yovani.** 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. Trabajo de grado (ingeniero químico). Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 2004.

- **DURÁN S., Querubín.** Evaluación de la Eficiencia en el Proceso de Recuperación de Almendra en una Planta Extractora de Aceite de Palma. Trabajo de grado (ingeniero químico). Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 2004.

- **CEPEDA, Héctor; PEDRAZA Denis.** Cálculo y Diseño de Hidrociclones para la Separación de Almendras y Cáscaras en la Industria del Aceite de Palma Africana. Trabajo de grado (ingeniero mecánico). Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga.1980.

- **KOYA O. A.; FAVORODE M. O.** Separation Theory for Palm Kernel and Shell Mixture on a Spinning Disc. Biosystems Engineering, 95 (3), 405–412, doi:10.1016/j.biosystemseng.2006.07.005.2006.Nigeria.2006

- **HENDERSON S. M.; PERRY R. L.** Agricultural Process Engineering. Third edition. The AVI Publishing Company, Inc. Westport, CT.1976.Cap.7

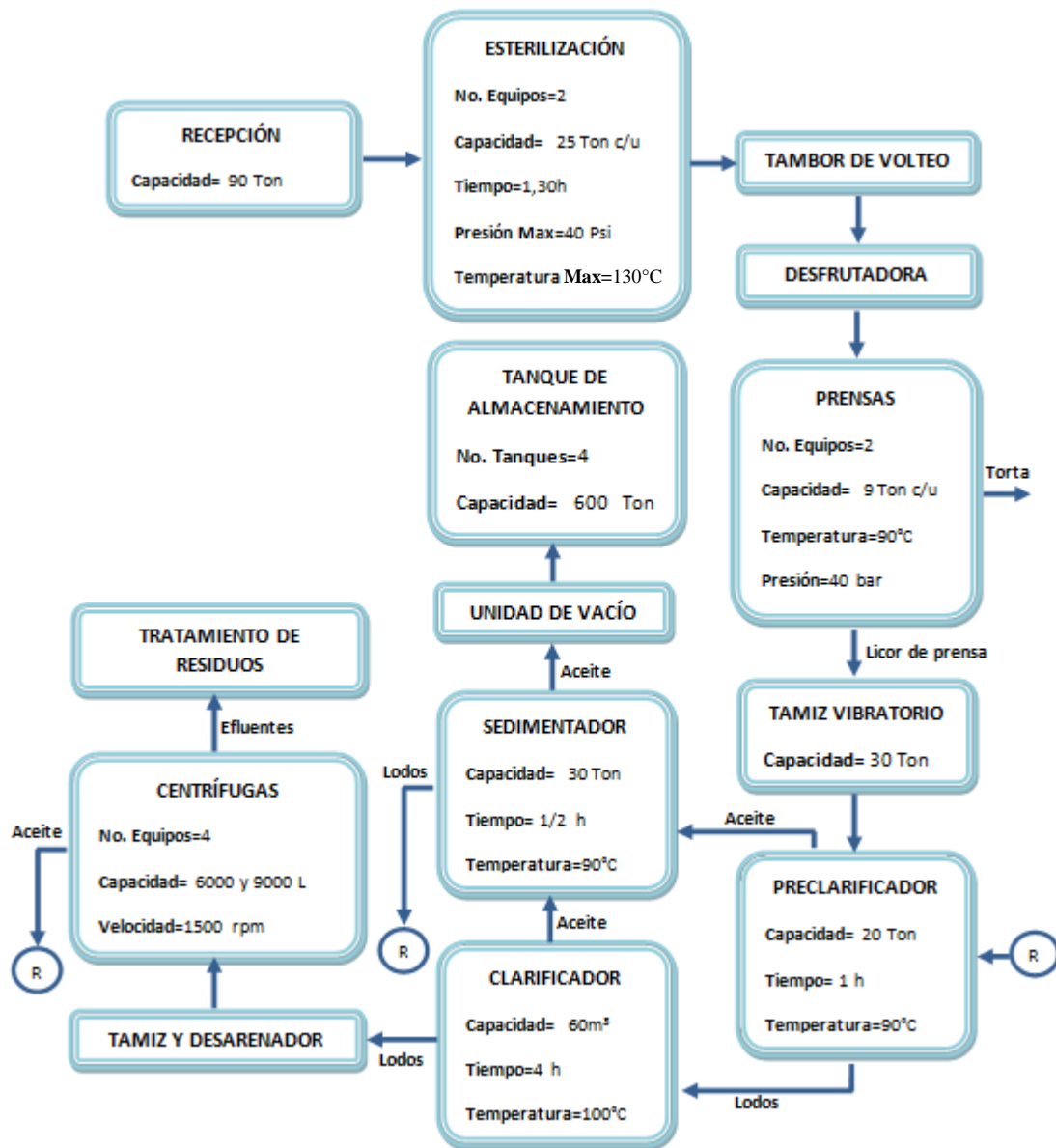
- **AKUBUO, C. O.; EJE B. E.** Palm Kernel and Shell Separator. Biosystems Engineering, 81(2), 193–199, doi:10.1016/biosystemeng.2001.0029.Nigeria.2002

- **HARMOND, J. E., et al.** Seed Cleaning and handling. Handbook No.179. USDA-Agr.1961.Págs.7-10

## **ANEXOS**

## ANEXO A

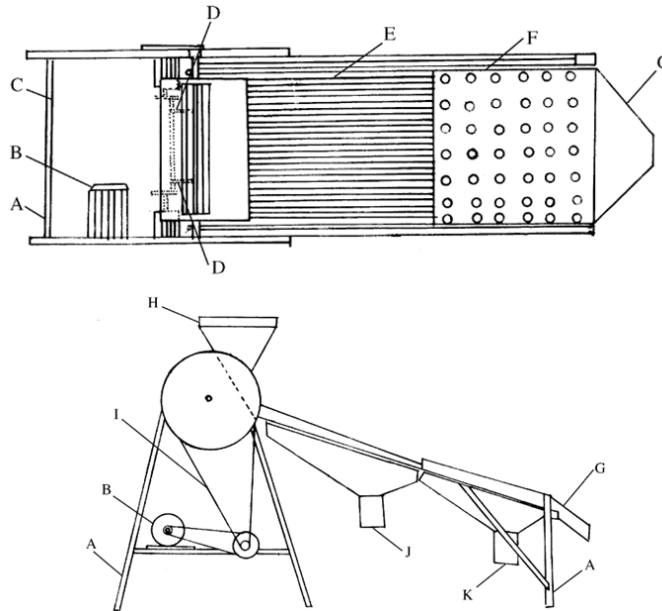
Diagrama de flujo en la sección de extracción y clarificación de la Extractora Central S.A. Fuente. El autor



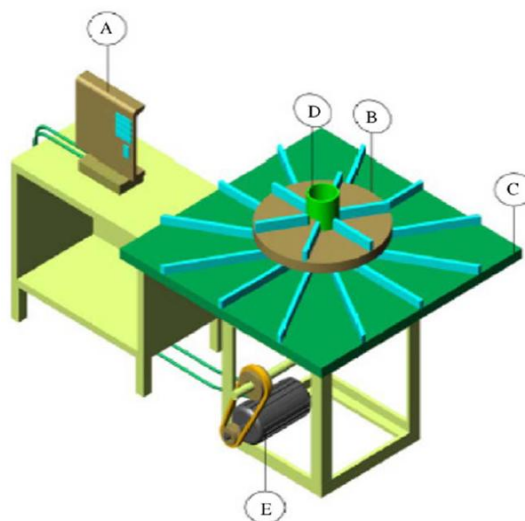
## ANEXO B

### Equipos diseñados para la separación de almendra-cáscara por vía seca

**Figura 8.** Separador de almendras y cáscaras: A, estructura; B, motor eléctrico; C, cigüeñal; D, bielas; E, sección de separación de cáscaras; F, sección de separación de almendras; G, Bandeja de descarga; H, tolva de alimentación; I, correa en V; J, ducto de cáscaras; K, ducto de almendras. **Fuente.** AKUBUO & EJE. 2001.

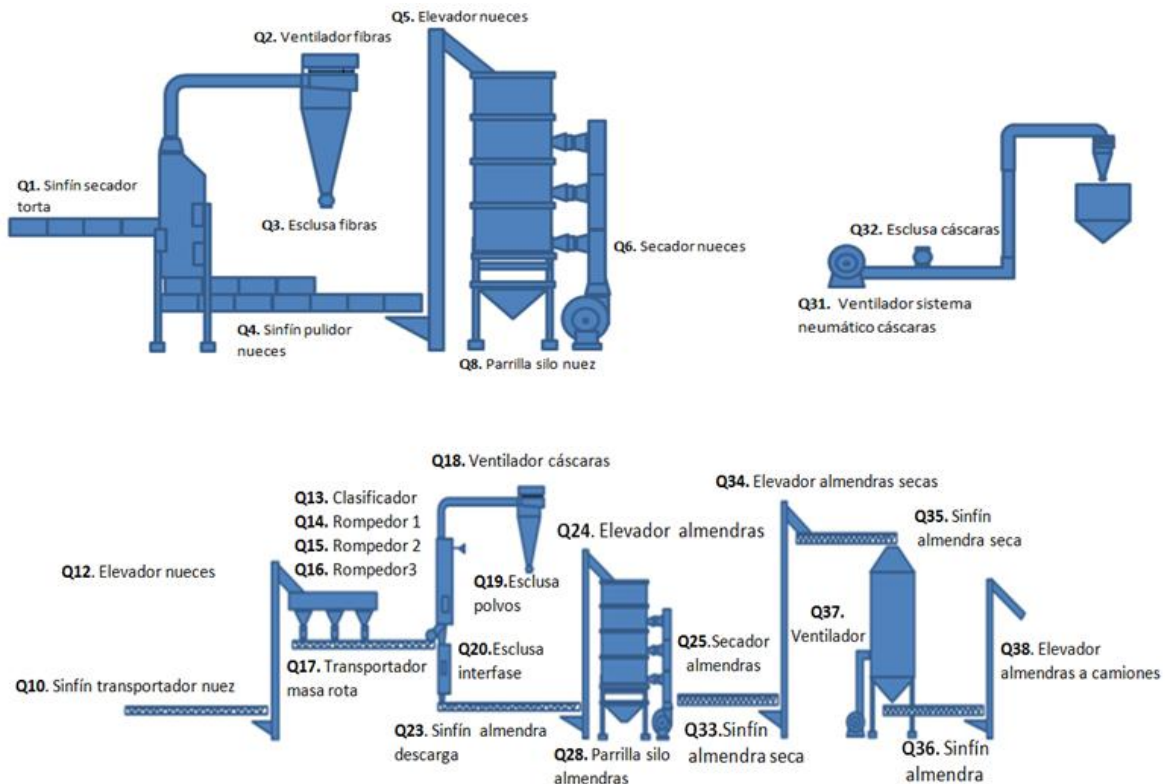


**Figura 9.** Máquina para la verificación de la teoría del movimiento centrífugo. A, panel de control de velocidad; B, disco rotatorio; C, bandeja colectora; D, motor eléctrico. **Fuente.** KOYA & FAVORODE. 2006.



## ANEXO C

### Principales equipos considerados en el consumo de energía en la sección de palmistería. Fuente. El autor



## ANEXO D

### Análisis estadístico

Con relación a los resultados obtenidos, es importante destacar que algunos de los tratamientos planteados y evaluados no mostraron ninguna separación de fases, luego estos tratamientos no se consideraron en el análisis estadístico y se muestran sombreados en la tabla 11. Asimismo, esta tabla presenta los diferentes tratamientos planteados como producto de las combinaciones posibles entre los factores y niveles de estudio seleccionados.

**Tabla 11.** Total de tratamientos y/o posibles combinaciones entre niveles y factores de estudio.

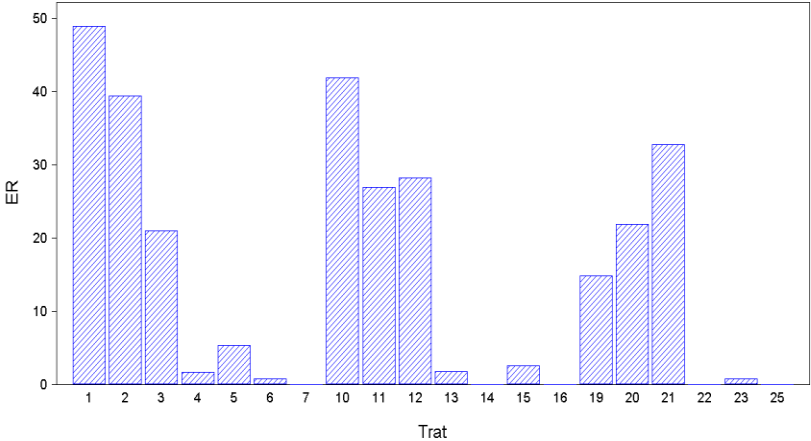
TOTAL DE TRATAMIENTOS EVALUADOS			
Tratamientos	Velocidad (rpm)	Angulo Lateral	Angulo Longitudinal
1	409,0	3,71	1,97
2	409,0	3,71	2,28
3	409,0	3,71	2,59
4	409,0	4,24	1,97
5	409,0	4,24	2,28
6	409,0	4,24	2,59
7	409,0	4,76	1,97
8*	409,0	4,76	2,28
9*	409,0	4,76	2,59
10	397,8	3,71	1,97
11	397,8	3,71	2,28
12	397,8	3,71	2,59
13	397,8	4,24	1,97
14	397,8	4,24	2,28
15	397,8	4,24	2,59
16	397,8	4,76	1,97
17*	397,8	4,76	2,28
18*	397,8	4,76	2,59
19	365,9	3,71	1,97
20	365,9	3,71	2,28
21	365,9	3,71	2,59
22	365,9	4,24	1,97
23	365,9	4,24	2,28
24*	365,9	4,24	2,59
25	365,9	4,76	1,97
26*	365,9	4,76	2,28
27*	365,9	4,76	2,59

\* Tratamientos que no representan una condición de operación adecuada.

### D1. Análisis estadístico de comparación de medias entre tratamientos

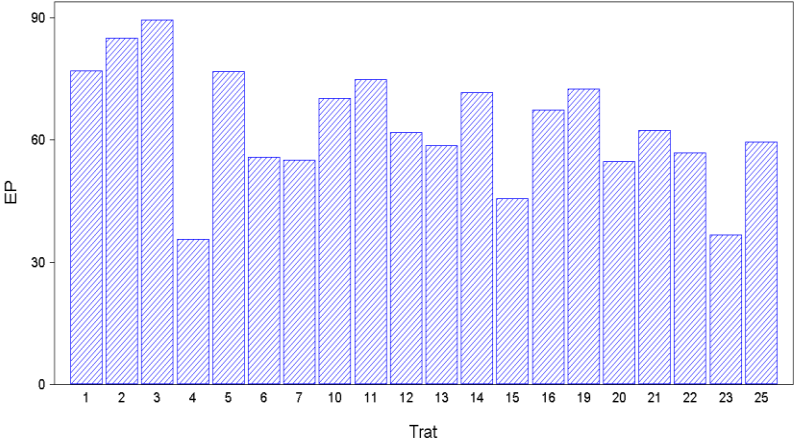
La gráfica 4 muestra las eficiencias reales de recuperación de almendra obtenidas para cada uno de los tratamientos evaluados, en donde cada tratamiento incluye 3 repeticiones completamente aleatorizadas. Así, se puede observar que los tratamientos 1, 2 y 10 presentan las mayores eficiencias reales (ER) con respecto a los demás tratamientos, tales eficiencias son calculadas considerando la almendra total como la suma de almendra entera y rota.

Por otro lado, los tratamientos 7, 14, 16, 22 y 25 presentan valores nulos de eficiencia de recuperación de almendra, dado que bajo estas condiciones de operación, solo se generaron dos corrientes en la salida del separador gravimétrico (interfase y fase liviana). Es decir, no se presentó formación de la fase pesada o almendra limpia.



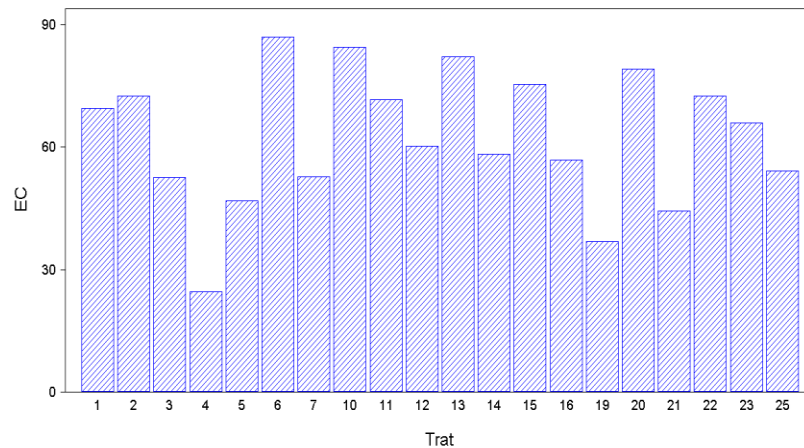
**Gráfica 4.** Eficiencia real de recuperación de almendra por tratamiento.

La gráfica 5 indica las eficiencias potenciales (EP) para cada uno de los ensayos evaluados, en donde los tratamientos 1,2, 3 y 5 presentan las mayores eficiencias potenciales, con valores superiores al 75%. El cálculo de la eficiencia potencial del sistema se efectuó considerando el valor de eficiencia real (gráfica 4) incluyendo el contenido de almendra (almendra entera y rota) en la corriente de interfase (actualmente este flujo se recircula al silo de nuez).



**Gráfica 5.** Eficiencia potencial de recuperación de almendra por tratamiento.

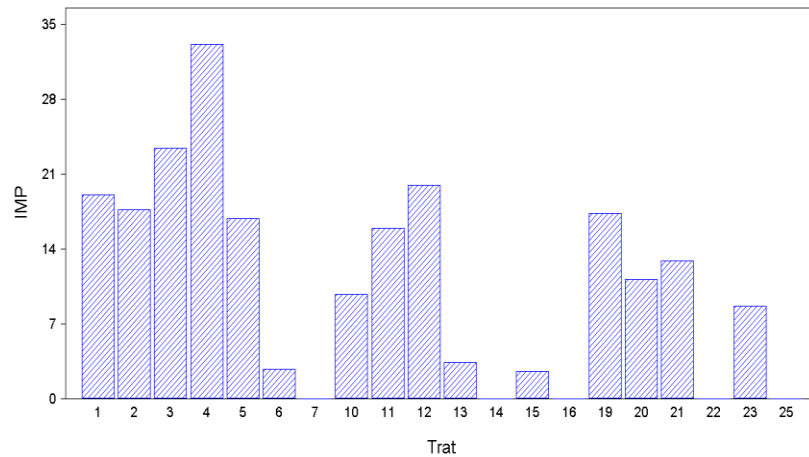
La gráfica 6 muestra las eficiencias en cuanto a recuperación de cáscaras (EC), obteniendo para los tratamientos 6, 10 y 13 las mayores eficiencias, con valores alrededor 87%, 83% y 78% respectivamente. No obstante, los tratamientos 6 y 13 presentaron bajas eficiencias de recuperación de almendra inferiores al 5%, mientras que el tratamiento 10 mostró una mejor eficiencia real de recuperación de almendra cercana al 42% con respecto a la almendra que ingresa al separador gravimétrico. En este orden de ideas, el tratamiento 10 se convierte en uno de los puntos de operación adecuado para la mesa gravimétrica, al igual que los tratamientos 1 y 2.



**Gráfica 6.** Eficiencia de recuperación de cáscaras para cada uno de los tratamientos evaluados.

Con relación a la calidad de las almendras obtenidas, se puede observar en la gráfica 7, que los tratamientos 6, 13 y 15 presentaron las más bajas impurezas (menores al 5%) en todos los ensayos evaluados. Sin embargo estos tratamientos también reportan la mínima eficiencia real de recuperación de almendra por debajo del 4%, dado que los flujos másicos obtenidos tanto en la fase de almendras como en la descarga lateral de la mesa gravimétrica son bajos comparados con las demás corrientes másicas de salida (interfase y fase de cáscaras o “liviana”).

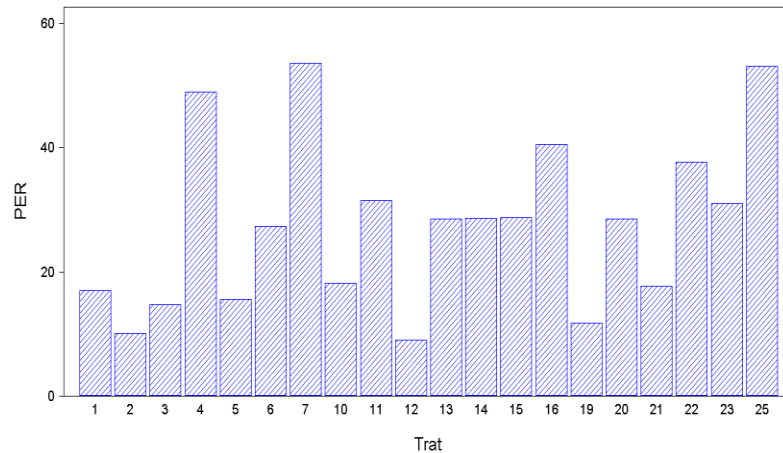
Por el contrario la mayoría de los tratamientos (con excepción de los tratamientos 3 y 4) alcanzan un nivel de impurezas inferior al 21%. No obstante, este parámetro de calidad es susceptible de mejorar con la manipulación y control adecuado de las guías de descarga (bloques de madera paralelos en la salida de la mesa), las cuales definen los flujos máxicos de las fases generadas y sus respectivas características en términos de composición.



**Gráfica 7.** Impurezas de la fase de almendras para cada uno de los tratamientos evaluados.

Finalmente, en la gráfica 8 se muestran las diferentes pérdidas de almendra obtenidas para cada uno de los ensayos evaluados. De igual forma se puede apreciar que las pérdidas de almendra para la mayoría de tratamientos oscilan entre el 15 y 25 %, siendo los tratamientos 2, 12 y 19 los de menores pérdidas de almendras. Sin embargo para estos últimos tres ensayos, el tratamiento 2 presenta una mayor eficiencia real de recuperación de almendra y cáscaras comparadas con los tratamientos 12 y 19.

De otro lado y al igual que en el caso de las impurezas, este parámetro de calidad también puede mejorarse en la medida en que se garantice un bajo porcentaje de rotura de almendra en los rompedores de nuez.

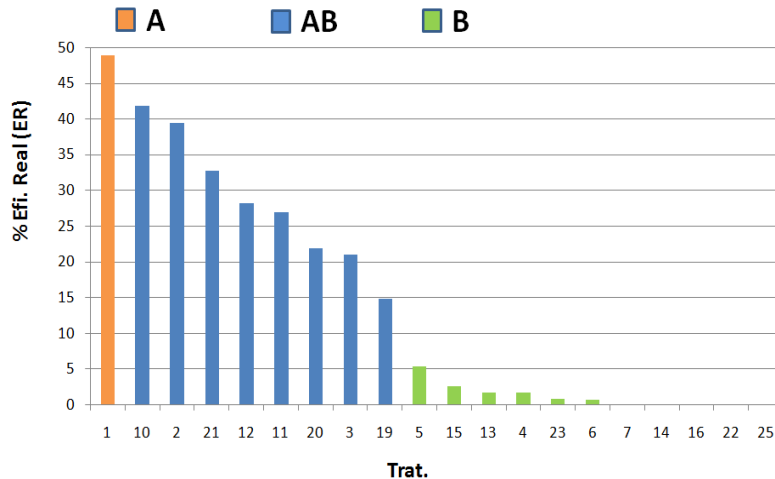


**Gráfica 8.** Pérdida de almendra en la fase de cáscaras para cada uno de los tratamientos evaluados.

## **D2. Análisis estadístico de las principales variables respuesta**

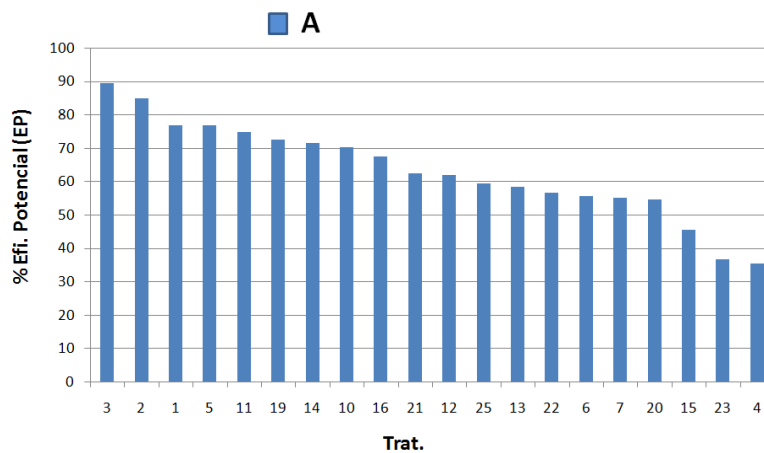
En este ítem se realiza una comparación de medias a partir de la definición de grupos estadísticos homogéneos entre tratamientos, utilizando la prueba de Tukey HSD como método de comparación. Así, para el caso de la variable respuesta, Eficiencia de Recuperación Real (ER), se obtuvieron 3 grupos homogéneos (A, AB y B) tal y como se observa en la gráfica 9. El grupo A muestra la mayor eficiencia (cerca del 50%) y al cual pertenece un solo tratamiento estadísticamente diferente con respecto a los demás grupos AB y B.

El grupo AB presenta un rango de eficiencias entre el 15 y 42%, en donde los tratamientos que conforman tal grupo no presentan diferencias estadísticas significativas entre ellos. Finalmente, aparece un tercer grupo B en el cual todos los tratamientos presentan porcentajes de eficiencia inferiores al 5%, siendo comparables con los tratamientos del grupo AB.



**Gráfica 9.** Grupos homogéneos estadísticos de la variable (ER) entre todos los tratamientos evaluados.

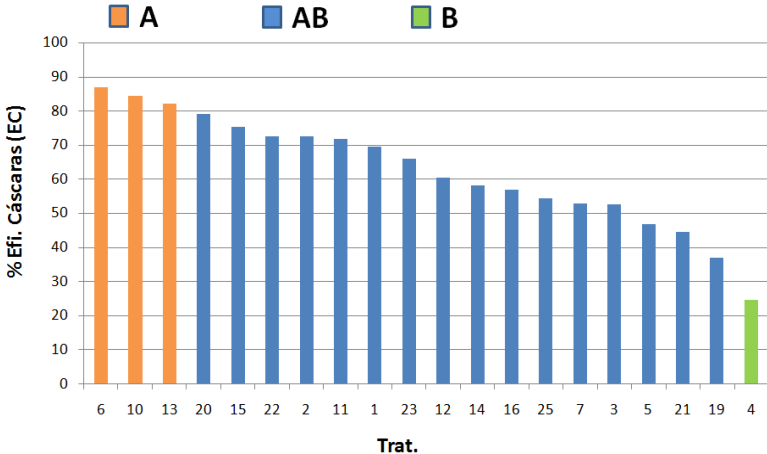
Con relación a la eficiencia potencial de recuperación de almendra (EP), se puede apreciar en la gráfica 10, que solamente existe un grupo homogéneo A, lo cual indica que para el caso de esta variable no existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos evaluados.



**Gráfica 10.** Grupos homogéneos estadísticos de la variable (EP) entre todos los tratamientos evaluados

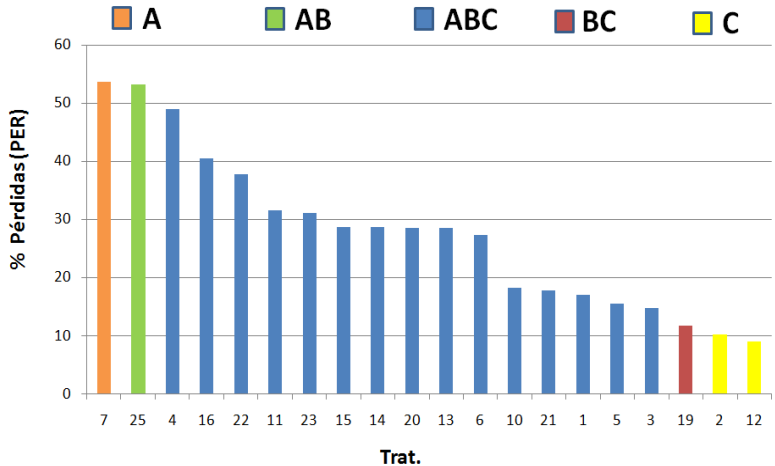
Por otro lado, la gráfica 11 muestra la eficiencia de recuperación de cáscaras (EC) para cada uno de los tratamientos y sus respectivos grupos homogéneos, en donde los ensayos 6, 10 y 13 correspondientes al grupo A, no presentan

diferencias estadísticas significativas y a su vez estos tratamientos son comparables y pueden llegar a comportarse con los descritos por el grupo AB. Finalmente se encuentra un tercer grupo B integrado por un solo tratamiento y con la menor eficiencia de recuperación de cáscaras.



Gráfica 11. Grupos homogéneos estadísticos de la variable (EC) por tratamiento.

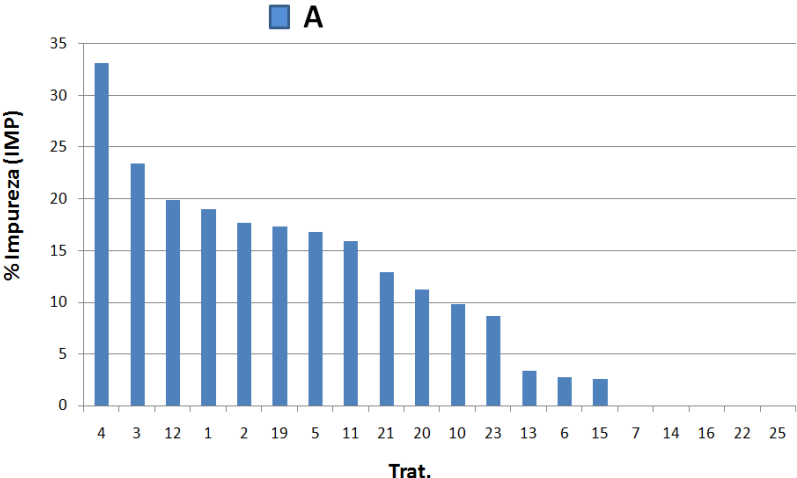
Los parámetros de calidad evaluados en los ensayos tales como las pérdidas de almendra e impurezas, se muestran en las gráfica 12 y 13 respectivamente. Con relación al porcentaje de pérdidas de almendra (medido en el flujo de cáscaras) se identificaron 5 grupos homogéneos, sin embargo, el grupo ABC, con valores de pérdidas entre 15 y 48%, incluyen el mayor número de tratamientos para los cuales no se registran diferencias estadísticas significativas.



Gráfica 12. Grupos homogéneos estadísticos de la variable (PER) entre todos los tratamientos evaluados

Por el contrario las pérdidas más bajas, alrededor de 10%, se reportaron en los grupos BC y C. De igual manera sucede con los grupos A y AB, quienes mostraron la más altas pérdidas de almendra superiores al 50%.

Finalmente, en la gráfica 13 se indica el porcentaje de impurezas obtenido en la fase de almendra recuperada, siendo el tratamiento 4 el de mayor porcentaje de impurezas (33%), mientras que el tratamiento 15 el de menor porcentaje de impurezas (3%). Sin embargo, se observa también que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos para la variable (IMP), dado que solo se estableció un grupo homogéneo estadístico entre todos los tratamientos desarrollados.

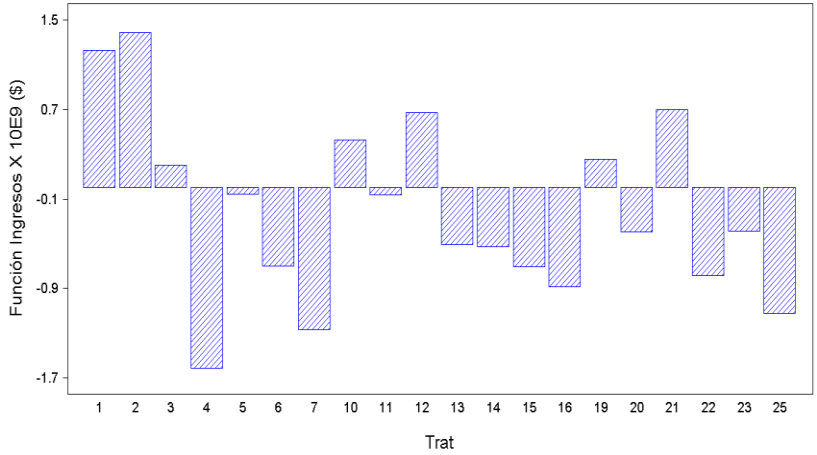


**Gráfica 13.** Grupos homogéneos estadísticos de la variable (IMP) entre todos los tratamientos evaluados.

**D3. Análisis multivariado de los tratamientos evaluados**

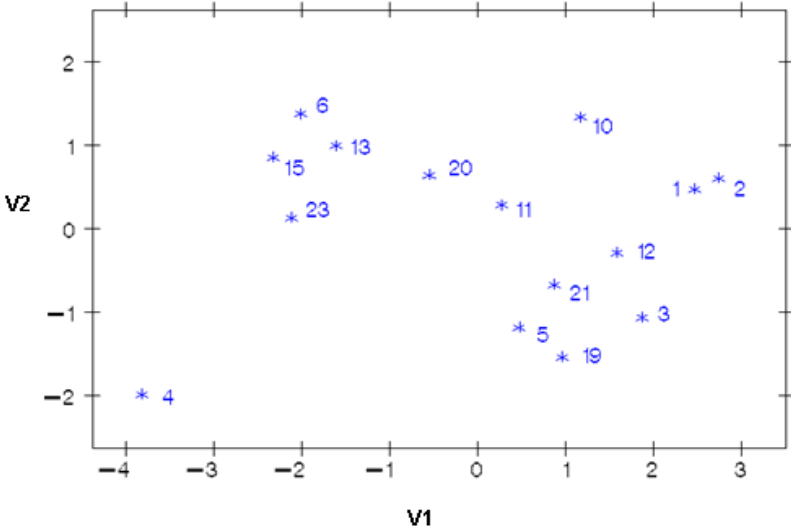
En la gráfica 14 se observan todos los tratamientos evaluados con su respectiva función de ingresos (valores positivos) o egresos (valores negativos) en pesos. La función de ingresos (ecuación 6) evaluada para cada tratamiento permite observar que los tratamientos con mejores ingresos anuales (valores positivos) corresponden a los tratamientos 1,2,10, 12 y 21 mientras que existe un gran

número de tratamientos inadecuados para la operación de la mesa gravimétrica, dado que se presenta un flujo negativo en términos económicos.



**Gráfica 14.** Función ingresos y egresos para cada tratamiento evaluado.

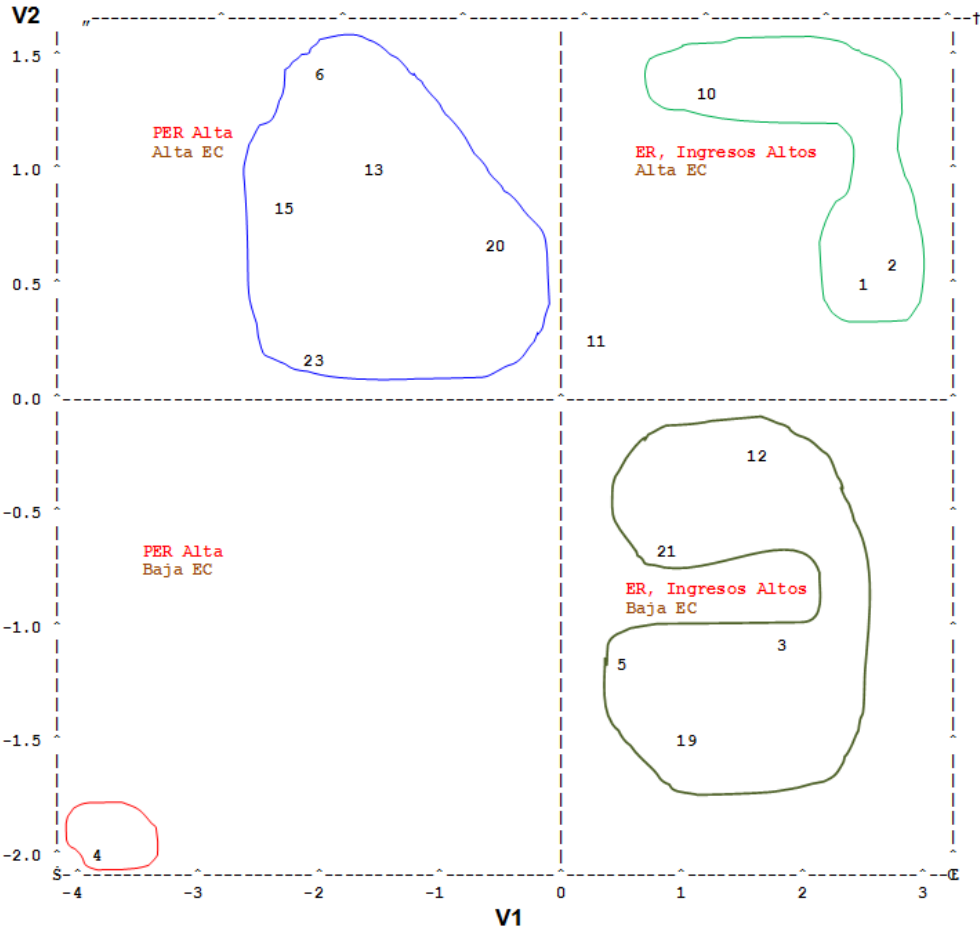
Con relación a la gráfica 15 se observa el comportamiento de los tratamientos evaluados de acuerdo al análisis multivariado, en donde los parámetros de operación son agrupados en dos variables compuestas denominadas V1 y V2.



**Gráfica 15.** Análisis multivariado de los tratamientos evaluados

La variable compuesta V1 consta de una relación directa entre la eficiencia real, potencial, eficiencia de separación de cáscaras, impurezas e ingresos totales, pero

al mismo tiempo también corresponde a una relación inversa con respecto a pérdidas de almendra. Por otro lado, la variable compuesta V2 obedece a un solo parámetro de operación correspondiente a la eficiencia de separación de cáscaras. En cuanto a la gráfica 16 se observa la distribución de los tratamientos evaluados de acuerdo al análisis multivariado realizado entre los mismos.



**Gráfica 16.** Análisis multivariado de los tratamientos evaluados. Subregiones

De igual forma en la gráfica 16 se observa cuatro subregiones correspondientes a los cuadrantes de la gráfica 15. Así, los cuadrantes 1 y 2 (superiores) tienen en común niveles altos de separación de cáscaras pero relaciones inversas con las pérdidas de almendra, mientras que los cuadrantes inferiores (3 y 4) poseen en común bajas eficiencias de separación de cáscaras y relaciones inversas únicamente con el parámetro de pérdidas de almendra.