

Propuesta de un diseño básico de una ruta de extracción de aceite de macauba a escala  
laboratorio.

Laura Vanesa Cifuentes Duarte y Irwin Yorvei Mayorga Cuellar

Trabajo de Grado para optar por el título de Ingeniero Químico

Practica empresarial

Director

Carlos Jesús Muvdi Nova

Dr. En ingeniería de procesos

Tutor

Laura Maileth Rey Hernández

Ingeniera química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2026

### **Agradecimientos**

Agradezco profundamente a mi mamá Rocio Duarte, por ser mi pilar, mi apoyo y mi motivación diaria; a Jonathan por creer en mí, por su constante compañía y aliento; a mi papá y a mi familia en general. De igual manera, extendiendo mi gratitud al profesor Carlos Muvdi por su valiosa guía académica, a mi tutora la ingeniera Laura Rey, por su orientación y dedicación, y a la empresa INAL SAS, por la oportunidad y confianza brindadas, así como a todos quienes de alguna manera contribuyeron a mi formación profesional, mis compañeros de carrera y profesores.

Laura Vanesa Cifuentes Duarte

Primeramente, agradezco a mi mamá, Aydee Cuéllar, y a mis hermanos, primos y cuñadas, quienes me apoyaron constantemente a lo largo de la carrera; sin ellos no lo hubiese logrado. Asimismo, agradezco a mis amigos de la universidad, quienes me ayudaron a sobrellevar todo lo que implica ser estudiante universitario. Agradezco a la empresa INAL y, en especial, a la ingeniera Laura Rey, por su paciencia y dedicación. Finalmente, expreso mi agradecimiento al profesor Carlos Muvdi por su valiosa enseñanza, tanto en el desarrollo del proyecto como en las asignaturas que tuve la oportunidad de cursar con él.

Irwin Mayorga Cuellar

**Tabla de contenido**

Introducción .....	9
1. Objetivos .....	11
1.1. Objetivo general.....	11
1.2. Objetivos específicos .....	11
2. Marco conceptual.....	12
3. Metodología .....	16
3.1. Alistamiento de la materia prima.....	16
3.2. Alistamiento de equipos.....	17
3.3. Ajuste de parámetros de operación mediante el desarrollo experimental.....	17
3.3.1. Morfología del fruto.....	17
3.3.2. Curva de Secado .....	18
3.3.3. Vía seca.....	19
3.3.4. Vía húmeda .....	21
3.3.5. Potencial de aceite del mesocarpio del fruto de Macauba .....	21
3.4. Caracterización fisicoquímica.....	22
4. Análisis de Resultados y Discusión .....	24
4.1. Caracterización morfológica.....	24
4.1.1. Partes del fruto .....	24
4.1.2. Diámetro y esfericidad.....	25

RUTA DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE MACAUBA	4
4.2. Contenido de agua del mesocarpio .....	26
4.2.1. Curva de secado .....	27
4.3. Potencial de aceite del mesocarpio del fruto de Macauba .....	28
4.4. Vía húmeda .....	30
4.4.1. Prueba preliminar .....	30
4.4.2. Desarrollo experimental.....	30
4.5. Vía seca .....	32
4.5.1. Composición del fruto.....	33
4.6. Caracterización fisicoquímica.....	33
4.7. Ruta de extracción de aceite de macauba .....	35
5. Conclusiones .....	36
6. Recomendaciones .....	38
Referencias bibliográficas.....	39

**Lista de tablas**

<b>Tabla 1.</b> Proporciones de las diferentes partes del fruto. ....	25
<b>Tabla 2.</b> Resumen estadístico de las mediciones de diámetro y esfericidad.....	26
<b>Tabla 3.</b> Potencial de extracción de aceite del mesocarpio del fruto de macauba .....	29
<b>Tabla 4.</b> Resultados de rendimiento y calidad de la extracción de aceite de macauba por vía húmeda.....	31
<b>Tabla 5.</b> Resultados de rendimiento y calidad de la extracción de aceite de macauba por vía seca. ....	32
<b>Tabla 6.</b> Composición y rendimientos del fruto fresco de macauba para la extracción de aceite por vía seca.....	33
<b>Tabla 7.</b> Resultados de análisis fisicoquímico del aceite de macauba. ....	34

**Lista de figuras**

<b>Figura 1.</b> Palma de macauba. ....	13
<b>Figura 2.</b> Racimo del fruto de macauba. ....	13
<b>Figura 3.</b> Diagrama de bloques de las rutas de extracción de aceite de macauba. ....	16
<b>Figura 4.</b> Alistamiento de equipos de laboratorio: a) Analizador de Grasas SOX406 por método Soxhlet;b) Prensa hidráulica; c) Autoclave vertical (VA-SD35). ....	17
<b>Figura 5.</b> Análisis morfológico del fruto de macauba: a) Peso promedio b) Separación de las partes que lo componen c) Diferentes estados de maduración. ....	18
<b>Figura 6.</b> Distribución uniforme del mesocarpio en bandejas para el secado. ....	19
<b>Figura 7.</b> Proceso de secado: a) Fruto de macauba sin epicarpio b) Tratamiento térmico del mesocarpio en el horno de convección forzada. ....	20
<b>Figura 8.</b> Fruto de macauba después de la esterilización en autoclave. ....	21
<b>Figura 9.</b> Potencial del aceite de macauba: a) Extractor Soxhlet b) Rotovapor Buchi. ....	22
<b>Figura 10.</b> Peso promedio del fruto. ....	24
<b>Figura 11.</b> Curva de evolución de la humedad en el tiempo. ....	27
<b>Figura 12.</b> Curva característica de secado del mesocarpio. ....	28
<b>Figura 13.</b> Mesocarpio triturado a) antes del secado b) después del secado. ....	29
<b>Figura 14.</b> Diagrama de bloques del proceso de extracción de aceite por vía Seca. ....	35

## Resumen

**Título:** Propuesta de un diseño básico de una ruta de extracción de aceite de macauba a escala laboratorio.\*

**Autor:** Laura Vanesa Cifuentes Duarte, Irwin Yorvei Mayorga Cuellar.\*\*

**Palabras clave:** Macauba, Esterilización, Secado.

**Descripción:** En el presente estudio se propuso una ruta básica de extracción de aceite de macauba a escala laboratorio, realizando una serie de pruebas preliminares para determinar la ruta más viable, teniendo en cuenta rendimiento y calidad del aceite obtenido, por medio de dos rutas de pretratamiento antes de la extracción mecánica, por vía húmeda con esterilización en autoclave y por vía seca en horno de convección forzada a 120°C. Inicialmente se caracterizó morfológicamente el fruto, estableciendo composiciones promedio de epicarpio (20,9 %), mesocarpio (38,3 %), endocarpio (29,1 %) y endosperma (11,7 %), humedad inicial de 46,6 % y peso promedio de 35,97 g. El potencial lipídico determinado por extracción Soxhlet con nhexano fue de 41,3 % en base seca, valor que coincide con la literatura. La vía seca optimizada (35 min, 9 % humedad residual, 1422 psi) alcanzó rendimientos de 14,2–19,2 % con acidez de 1,42– 2,73 mg KOH/g, mientras la vía húmeda mostró rendimientos inferiores (6,8–9,5 %) y acidez crítica (11,1– 22,7 mg KOH/g) por degradación hidrolítica oxidativa. El aceite caracterizado mediante normas ISO y NTC presentó índice de yodo de 95,1 g I<sub>2</sub>/100 g, saponificación de 195,2 mg KOH/g, peróxidos de 6,5 meq O<sub>2</sub>/kg, DOBI de 2,1 y bajo contenido de fósforo (0,0019 %). Los resultados demuestran la superioridad técnica de la vía seca, garantizando mayor eficiencia extractiva y calidad, con potencial de ácidos grasos monoinsaturados, favorable para aplicaciones industriales sostenibles sin competencia con cultivos alimentarios.

\* Trabajo de Grado.

\*\* Facultad de ingenierías fisicoquímicas. Escuela de ingeniería química. Ingeniería química. Director: Carlos Jesús Muvdi Nova Dr. En ingeniería de procesos Codirector: Laura Maileth Rey Hernández Ingeniera química.

### Abstract

**Title:** Proposal for a basic design of a laboratory-scale macauba oil extraction process.\*

**Author(s):** Laura Vanesa Cifuentes Duarte, Irwin Yorvei Mayorga Cuellar.\*\*

**Keywords:** Macauba, Sterilization, Drying.

**Description:** In this study, a basic route for macauba oil extraction on a laboratory scale was proposed, carrying out a series of preliminary tests to determine the most viable route, taking into account the yield and quality of the oil obtained, using two pretreatment routes prior to mechanical extraction: wet via autoclave sterilization and dry via forced convection oven at 120°C. Initially, the fruit was morphologically characterized, establishing average compositions of epicarp (20,9%), mesocarp (38,3%), endocarp (29,1%), and kernel (11,7%), initial moisture content of 46,6% and average weight of 35,97 g. The lipid potential determined by Soxhlet extraction with n-hexane was 41,3% on a dry basis, a value that coincides with the literature. The optimized dry method (35 min, 9% residual moisture, 1422 psi) achieved yields of 14,2–19,2% with acidity of 1,42–2,73 mg KOH/g, while the wet method showed lower yields (6,8–9,5%) and critical acidity (11,1–22,7 mg KOH/g) due to oxidative hydrolytic degradation. The oil characterized by ISO and NTC standards had an iodine index of 95,1 g I<sub>2</sub>/100 g, saponification of 195,2 mg KOH/g, peroxides of 6,5 meq O<sub>2</sub>/kg, DOBI of 2,1, and low phosphorus content (0,0019%). The results demonstrate the technical superiority of the dry method, ensuring greater extraction efficiency and quality, with a monounsaturated fatty acid profile favorable for sustainable industrial applications without competition with food crops.

\* Degree Work.

\*\* Faculty of Physical-Chemical Engineering. School of Chemical Engineering. Chemical Engineering. Director: Carlos Jesús Muvdi Nova, Ph.D. in Process Engineering. Co-director: Laura Maileth Rey Hernández, Chemical Engineer.

## Introducción

INAL S.A.S. es una empresa colombiana del sector metalmecánico de Bucaramanga, Santander, que posee una reconocida trayectoria en el diseño, ingeniería y fabricación de equipos y soluciones industriales para el sector agroindustrial, con énfasis en el procesamiento de aceites vegetales. Con experiencia específica en el desarrollo de infraestructura y tecnología para la extracción y refinación de aceite de palma (*Elaeis guineensis*) (Industrias Acuña, 2025b).

En un contexto global donde la sostenibilidad ambiental y la eficiencia económica son prioritarias, la industria oleícola busca alternativas que reduzcan el impacto ambiental y optimicen la producción de aceites vegetales (Duque et al., 2025). No obstante, el reto surge al intentar aplicar los procesos a una materia prima emergente como la macauba (*Acrocomia aculeata*), cuya industrialización aún se encuentra en etapas iniciales y requiere establecer condiciones de procesamiento adecuadas.

La macauba destaca como alternativa frente a otras oleaginosas ya que es una palma neotropical, con alta resistencia ecológica y capacidad para prosperar en suelos marginales o de baja fertilidad, lo que minimiza impactos ambientales y competencia con cultivos alimentarios. Comparado principalmente con el aceite de palma africano (*Elaeis guineensis*) que representa el 40% del mercado mundial, la macauba ofrece un mayor rendimiento potencial (4-6 t/ha/año) y un contenido superior de ácido oleico (50-60%) (Colombo et al., 2018).

En particular, destaca en la industria de biocombustibles, donde se posiciona como materia prima prometedora para combustibles de aviación sostenibles (SAF) mediante rutas como HEFA-SPK, con potencial para cubrir hasta el 3% del consumo de JET A-1 en Brasil y reducir emisiones de CO<sub>2</sub> hasta en un 80% en comparación con combustibles fósiles (WWF & IIASA, 2024). Estudios geoespaciales en Sudamérica estiman un potencial técnico de 4.568 PJ mediante

intercropping con pastos como *Brachiaria*, representando el 22% del total de biocombustibles sostenibles en la región, con ahorros de gases de efecto invernadero superiores al 60% y beneficios en rehabilitación de suelos degradados. Además, se aplica en biodiesel ligero para motores a reacción, para cosméticos como el shampoo y cremas, en la industria de alimentos y oleoquímicos, con coproductos como harinas proteicas para alimentación animal y biochar para captura de carbono, fomentando una valorización integral de la biomasa. Proyectos como el de Embrapa y Acelen Renewables en Brasil buscan domesticar la especie para escalar su producción, generando empleo, aunque enfrentan desafíos en mejora genética y eficiencia extractiva (Advanced Biofuels USA, 2023; Zimmer & de Andrade, 2021).

Por estas razones, es fundamental encontrar una ruta para mejorar los procesos de extracción del aceite. Y surge la pregunta ¿Cuál es la ruta de extracción mecánica de aceite de macauba más adecuada a escala laboratorio, comparando los pre tratamientos por vía seca (secado al horno) y vía húmeda (esterilización con autoclave), en términos de mayor rendimiento y mejor calidad fisicoquímica como acidez y humedad?

## 1. Objetivos

### 1.1. Objetivo general

Proponer una ruta básica de extracción de aceite de macauba a escala laboratorio, evaluando el rendimiento de extracción de aceite y los parámetros de calidad del aceite obtenido.

### 1.2. Objetivos específicos

- Analizar las propiedades morfológicas del fruto de la macauba.
- Evaluar la ruta de extracción por vía seca variando tiempo de secado y presión en el prensado.
- Evaluar la ruta de extracción por vía húmeda variando tiempo de esterilización y presión en el prensado.

## 2. Marco conceptual

La macauba es una especie perteneciente al género *Acrocomia aculeata* “cuyo nombre deriva del griego *àkron*, en referencia a la forma de corona de su copa, y *aculeata*, aludiendo a las numerosas espinas que cubren su estípite (Figura 1) (Rengel, 2023)”. Se trata de una palma endémica de la región neotropical, distribuida extensamente por el continente americano. Las evidencias sugieren que su centro de origen más probable se localiza en la región del Cerrado sudamericano, específicamente en el área de Monte Alegre (Pará, Brasil), desde donde se dispersó al resto del continente.

Esta especie se caracteriza por su porte robusto y arbóreo, pudiendo alcanzar hasta 15 m de altura en su estado adulto. Presenta un estípite (tallo) cilíndrico, erecto y generalmente espinoso. Su follaje está compuesto por hojas grandes, plumosas, de 2,5 a 3 m de longitud, las cuales albergan entre 234 y 370 folíolos de 0,5 a 0,6 m de largo (Leonardo & Cervi, 2009). Sus frutos son drupas globosas que se agregan en racimos voluminosos, con un diámetro variable entre 32 y 43 mm según el ecotipo (Figura 2). Morfológicamente, el fruto maduro presenta un epicarpio coriáceo y quebradizo de color verde a marrón oscuro. Internamente, posee un mesocarpio carnoso, de textura fibrosa y mucilaginosa, rico en aceite y de coloración que varía entre el verde, amarillo y naranja oscuro. En su interior, un endocarpio rígido y lignificado protege de una a tres semillas, cuyo endospermo es sólido y rico en lípidos, proteínas y fibra (Motoike & Hilger, 2024).

*A. aculeata* es una especie perennifolia, heliófila y pionera, con una notable capacidad para formar poblaciones extensas y dominantes. Exhibe una alta resiliencia ecológica, comportándose como una especie pionera en sucesiones secundarias tempranas de origen antrópico o natural. Esta condición se refleja en su elevada tolerancia a adversidades ambientales y en un eficiente rendimiento fisiológico, particularmente en lo relacionado con el intercambio gaseoso. Su

adaptabilidad a suelos marginales y degradados la posiciona como una especie robusta para la recuperación de áreas (Motoike & Hilger, 2024).

**Figura 1.**

*Palma de macauba.*



[Fotografía de Daniel Rengel]. (2023). Coyol – *Acrocomia aculeata*. Planterista (<https://planterista.com/plantas/coyol-acrocomia-aculeata/>)

**Figura 2.**

*Racimo del fruto de macauba.*



Recientemente, la macauba ha ganado considerable atención en la literatura científica debido a su alto potencial como cultivo oleaginoso. Estudios realizados en países como Brasil, México y Colombia (2010-2024) destacan que sus semillas pueden contener hasta un 50-60% de aceite en peso seco, un rendimiento comparable o superior al de otras oleaginosas tropicales establecidas. El aceite, extraído tanto del mesocarpio como de la endosperma, presenta una composición química valiosa, rica en ácidos grasos como el oleico y el palmítico. Esta combinación de alta productividad de aceite y su capacidad para crecer en suelos marginales, sin competir con cultivos alimenticios intensivos, la convierte en una alternativa sumamente prometedora y sostenible para la producción de biocombustibles y otros bioproductos de alto valor (De SPaulo, s. f.).

El fruto de la palma de macauba presenta una notable variabilidad en su desarrollo y composición, influenciada por la región, el lote, las condiciones climáticas y las características del suelo. En regiones con mayor humedad relativa y al inicio de la temporada de lluvias, la capacidad fotosintética de la palma aumenta, incrementando el rendimiento de aceite en el mesocarpio, con un mayor contenido de ácido oleico, especialmente en frutos senescentes. La fertilidad del suelo, la distribución del tamaño de las partículas, la materia orgánica y micronutrientes como zinc y manganeso determinan el peso y tamaño del fruto. Bajo estrés hídrico, la palma mantiene niveles estables de prolina y clorofila, previniendo daños oxidativos y permitiendo una recuperación eficiente. Esta variabilidad entre regiones climáticas subraya el impacto significativo del ambiente en el potencial productivo de la macauba (Oliveira et al., 2022; Alfaro-Solís et al., 2020).

El aceite de mesocarpio de macauba, caracterizado por un perfil lipídico con aproximadamente un 64% de ácidos grasos monoinsaturados (destacándose el ácido oleico como principal componente), presenta una alta estabilidad oxidativa que lo hace idóneo para diversas

aplicaciones. Esta estabilidad, evidenciada por un valor de peróxidos dentro de los límites estándar para aceites crudos, es crucial tanto para su uso en biocombustibles como en la industria cosmética y alimentaria. Para la producción de biodiesel mediante transesterificación alcalina, es fundamental que el aceite tenga un índice de acidez bajo, requisito que el de macauba cumple, además de ajustarse a las especificaciones internacionales en parámetros como densidad, viscosidad cinemática y contenido de ésteres. La evaluación de estas propiedades se realiza conforme a los estándares analíticos de la American Oil Chemists Society (AOCS) y las recomendaciones de la Agencia Nacional de Vigilancia Sanitaria (ANVISA), lo que garantiza su calidad y versatilidad (Nunes et al., 2015).

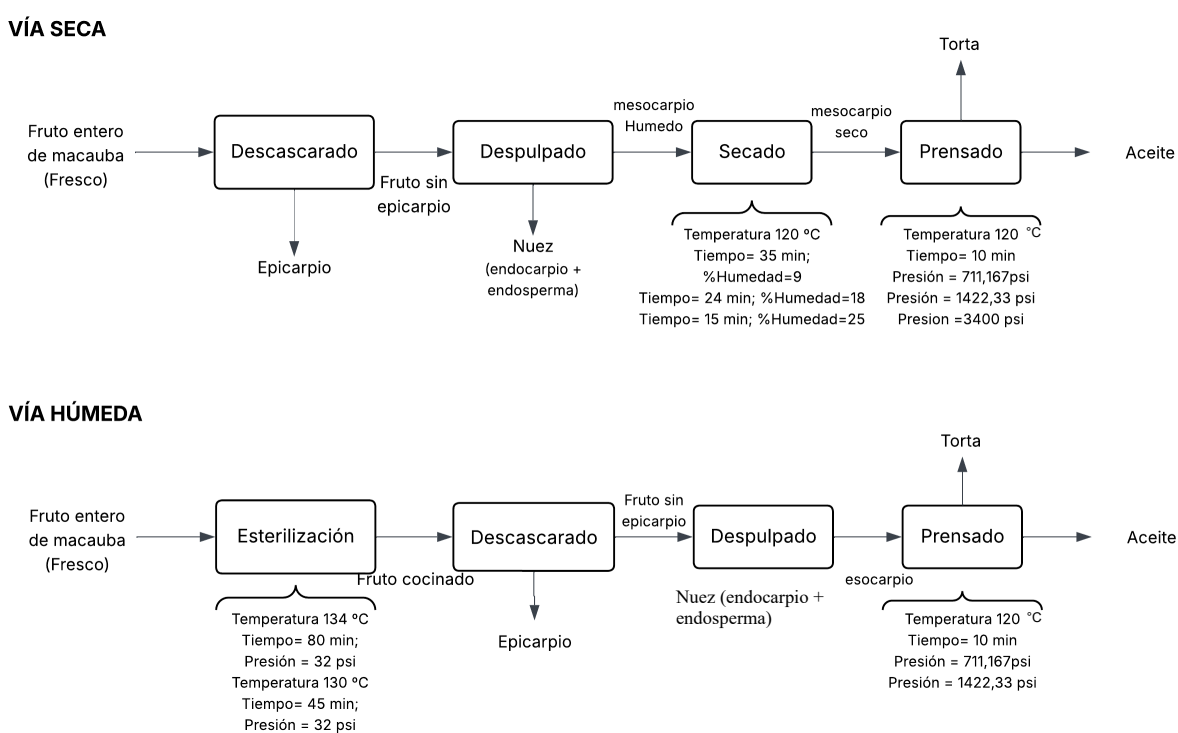
El aceite de macauba, no cuenta actualmente con una normativa específica que regule su producción o calidad. En este contexto, se propone analizar sus parámetros fisicoquímicos y de composición, comparándolos con los del aceite de palma (*Elaeis guineensis Jacq.*), ampliamente estudiado y regulado, para evaluar sus características y potenciales aplicaciones.

### 3. Metodología

Para el desarrollo del trabajo de investigación se llevaron a cabo una serie de etapas como se observa en la Figura 3, donde se representa el diagrama de bloques del proceso, el cual detalla las dos vías de extracción de aceite y las condiciones de operación para cada proceso. Acompañado de una revisión bibliográfica continua a lo largo de todo el proyecto.

**Figura 3.**

*Diagrama de bloques de las rutas de extracción de aceite de macauba.*



#### 3.1. Alistamiento de la materia prima

La empresa se contactó con los encargados del cultivo de la palma de macauba ubicados en el departamento de Santander, exactamente en Lebrija, cosechado en varias fincas vecinas, una de ellas con el nombre de “El tambor”. El cultivo tiene una única cosecha anual que se realiza durante los meses de febrero, marzo y abril, con una duración de dos a tres meses. El fruto tarda aproximadamente cuatro meses en estar listo para ser cosechado, y para este caso de estudio se

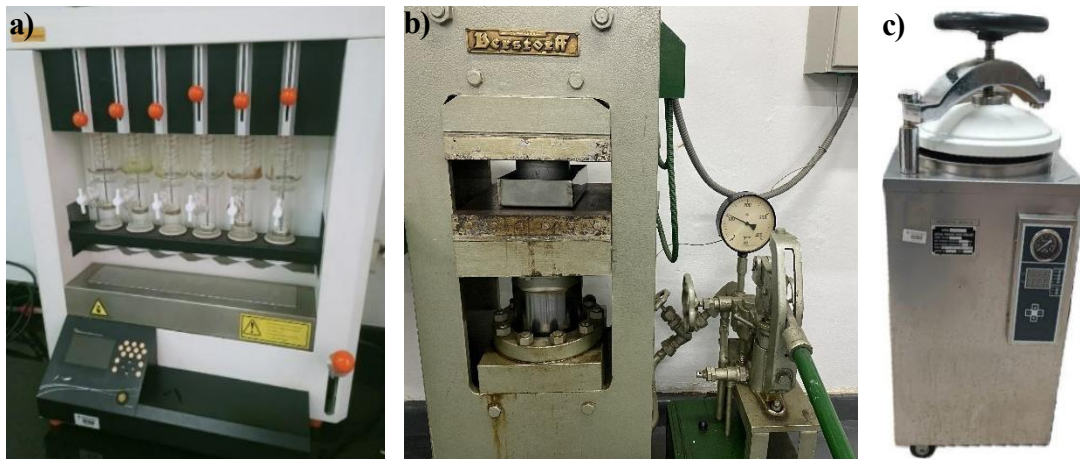
recolecta cuando el fruto comienza a caer al suelo o empieza a desgranarse del racimo por sí solo (no se corta ni se arranca del racimo). Al llegar el fruto a la ciudad de Bucaramanga se transportó a la empresa INAL, y posteriormente, fue llevado al laboratorio de procesos de la Universidad Industrial de Santander en donde se realizaron las primeras pruebas preliminares.

### 3.2. Alistamiento de equipos

La parte experimental se llevó a cabo en los laboratorios de Tecnoparque y la UIS, como se ve en la Figura 4, los principales equipos que se usaron en el desarrollo del proyecto fueron: el Analizador de grasas SOX406, la autoclave vertical (VA-SD35), la prensa hidráulica y el horno de convección forzada; además de vidriería de laboratorio, reactivos, embaces y todo lo requerido durante el proceso.

#### Figura 4.

*Alistamiento de equipos de laboratorio: a) Analizador de Grasas SOX406 por método Soxhlet; b) Prensa hidráulica; c) Autoclave vertical (VA-SD35).*



### 3.3. Ajuste de parámetros de operación mediante el desarrollo experimental

#### 3.3.1. Morfología del fruto

Para el análisis morfológico del fruto, primero se determinó el peso promedio seleccionando frutos al azar y conformando grupos de diferentes tamaños. Se pesaron inicialmente

10 frutos, luego 20, 30, 50, 70 y 90, registrando el peso total de cada grupo (Figura 5a). Con estos datos se construyó una curva cuyo comportamiento lineal permitió obtener el peso promedio del fruto a partir de la pendiente de la recta. Posteriormente, se evaluaron las dimensiones del fruto mediante la medición de diámetro longitudinales y transversales con el calibrador digital, tomando varias muestras al azar para obtener valores representativos. Finalmente, para determinar la composición y el porcentaje en masa de cada parte del fruto, se seleccionaron nuevamente varios frutos al azar y se separaron sus partes: epicarpio, mesocarpio, endocarpio y endosperma. Cada fracción se pesó individualmente (Figura 5b), junto con el peso total del fruto, con el fin de calcular el porcentaje correspondiente de cada componente en la estructura del fruto.

### Figura 5.

*Análisis morfológico del fruto de macauba: a) Peso promedio b) Separación de las partes que lo componen c) Diferentes estados de maduración.*



#### 3.3.2. Curva de Secado

Para determinar la curva de secado del mesocarpio, primero se peló el fruto y se retiró cuidadosamente el mesocarpio, que luego se distribuyó de manera uniforme en bandejas con un área de 672 cm<sup>2</sup>. Esta bandeja se colocó en un horno de convección forzada a 120 °C (Figura 6),

y cada 15 min se retiraba para pesarla, registrando cada valor antes de volver a introducirla. El procedimiento, realizado por duplicado, se repitió hasta que el peso dejó de variar de forma significativa, indicando la eliminación de la humedad libre. Con los pesos registrados a lo largo del tiempo se determinó la humedad total del mesocarpio y se construyó la curva de secado que describe la evolución de la pérdida de humedad durante el proceso.

**Figura 6.**

*Distribución uniforme del mesocarpio en bandejas para el secado.*



**3.3.3. Vía seca**

Debido al alto contenido de humedad del fruto de macauba, se optó por implementar la vía seca. Para comenzar, se tuvo que evaluar el método más eficiente para secar el fruto, ya sea secarlo completo, el solo epicarpio o exclusivamente el mesocarpio, al ser esta la fracción de interés para la extracción de aceite. Con esto se comprobó que el mejor secado se obtiene cuando el calor se aplica directamente al mesocarpio, por ende, primero se eliminó el epicarpio lo que se llama “descascarado”. Luego, se retiró el mesocarpio, proceso denominado “despulpado” (Figura 7a). A continuación, una muestra representativa de mesocarpio se llevó al horno para determinar su contenido de humedad total. Con este dato cuantificado, se colocó en una bandeja el mesocarpio, de manera uniforme, para su secado en horno a una temperatura constante de 120 °C (Figura 7b).

Se eligió esta temperatura porque, en pruebas previas con valores más altos, el material se carbonizaba rápidamente. El proceso del secado se monitorizó mediante pesajes sucesivos a intervalos de 30 min, hasta alcanzar el porcentaje de humedad objetivo según el tiempo preestablecido. Terminado este proceso, el mesocarpio seco fue sometido a un proceso de prensado en una prensa hidráulica a una temperatura de 120 °C y presiones de 711,167 y 1422,33 psi (presión sugerida por los técnicos de laboratorio). Tras el prensado, se recolectó el aceite extraído en embaces ámbar, que posteriormente se llevaron a laboratorio para el análisis de contenido de humedad por el método de pérdida por secado en un analizador de humedad e índice de acidez, parámetros claves para definir la calidad del aceite. Por último, se registraron los resultados obtenidos en esta etapa para establecer los balances de masa que contemplen las entradas y salidas del sistema.

**Figura 7.**

*Proceso de secado: a) Fruto de macauba sin epicarpio b) Tratamiento térmico del mesocarpio en el horno de convección forzada.*



Dado que el objetivo fundamental del estudio consistía en determinar la metodología o ruta más adecuada para optimizar el proceso, también se realizó una prueba preliminar de extracción de aceite, omitiendo cualquier tratamiento térmico o mecánico previo. El procedimiento implicó el descascarado y despulpado manual del fruto, para luego someter el mesocarpio directamente al

prensado. Se llevaron a cabo dos ensayos: uno en frío, a temperatura ambiente, y otro en caliente, aplicando una temperatura de 120 °C, pero los resultados no fueron satisfactorios.

#### ***3.3.4. Vía húmeda***

Se definió la implementación de la vía húmeda, basada en un proceso de esterilización. Este se realizó en una autoclave a condiciones de temperatura de 130 °C, presión de 32 psi y tiempo de 45 min en el laboratorio de TecnoParque, utilizando 22 frutos distribuidos en tres grupos de igual tamaño: sin epicarpio, con epicarpio intacto y con epicarpio fracturado. Tras el proceso de esterilización (Figura 8), los frutos fueron palpados manualmente e inspeccionados mediante el uso de un cuchillo, con el objetivo de evaluar su grado de cocción y determinar su nivel de blandeza. Finalmente, el fruto se sometió a las mismas condiciones de descascarado, despulpado y prensado que la vía seca, para tener una comparación entre ambas rutas en proceso mecánico y se registraron los resultados obtenidos en esta etapa para establecer los balances de masa que contemplen las entradas y salidas del sistema.

#### **Figura 8.**

*Fruto de macauba después de la esterilización en autoclave.*



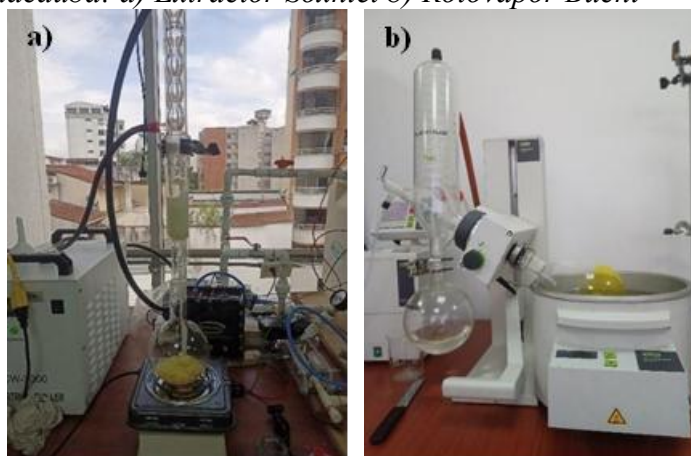
#### ***3.3.5. Potencial de aceite del mesocarpio del fruto de Macauba***

Para la determinación del potencial de aceite del fruto de macauba, se inició rompiendo el epicarpio con ayuda de una superficie dura o un mortero y, una vez expuestos, se retiró completamente el mesocarpio del endocarpio utilizando un cuchillo o bisturí. El mesocarpio se

colocó en bandejas y se secó en estufa a 120 °C durante aproximadamente una hr y media a dos hrs, hasta eliminar la mayor parte de la humedad. Posteriormente, el material seco se trituró hasta obtener una fibra más fina. Se pesaron porciones entre 5 y 20 g de mesocarpio seco, las cuales se introdujeron en cartuchos o papel filtro y se colocaron en los extractores Soxhlet (Figura 9a). La extracción se realizó empleando n-hexano al 99% como solvente, durante un período de 6 a 7 hr en operación continua. Finalizado el proceso, el solvente se separó del extracto mediante rotoevaporación hasta obtener el aceite crudo libre de n-hexano (Figura 9b). Con este aceite recuperado se efectuó el balance de masa correspondiente para determinar la cantidad máxima de aceite presente en el mesocarpio, es decir, su potencial de extracción. Finalmente, el aceite obtenido se almacenó en frascos limpios y se conservó en refrigeración a 4 °C.

### Figura 9.

*Potencial del aceite de macauba: a) Extractor Soxhlet b) Rotovapor Buchi*



### 3.4. Caracterización fisicoquímica

El objetivo consistió en identificar la ruta de extracción con mayor potencial para el aceite de macauba. para ello, se obtuvieron, mediante una prueba preliminar, cuatro muestras por vía húmeda y cinco por vía seca. Estos aceites fueron analizados en el laboratorio para determinar el índice de acidez y humedad, parámetros considerados suficientes para evaluar la calidad básica

del aceite y comparar la eficiencia de los procesos, lo que permitió descartar una de las rutas sin necesidad de realizar análisis más complejos. Para observar la calidad del aceite por el método Soxhlet, se analizó en el laboratorio el índice de acidez, el índice de saponificación y el DOBI. Una vez establecida la ruta mecánica más adecuada, se procedió a una nueva extracción con un fruto fresco con características similares al anterior. La selección de la mejor ruta se basó en los criterios de rendimiento y calidad del aceite, determinados mediante los análisis de laboratorio previamente realizados. Con la ruta definitiva establecida, se repitió el proceso de extracción con el nuevo fruto y se empleó una prensa hidráulica con la capacidad de aumentar la presión a 3400 psi. De este modo, se obtuvo una nueva muestra de aceite, la cual se envió a un laboratorio especializado. El análisis de calidad incluyó la determinación de humedad, densidad, índice de acidez, índice de peróxidos, índice de saponificación, índice de yodo y deterioro del índice de blanqueamiento (DOBI).

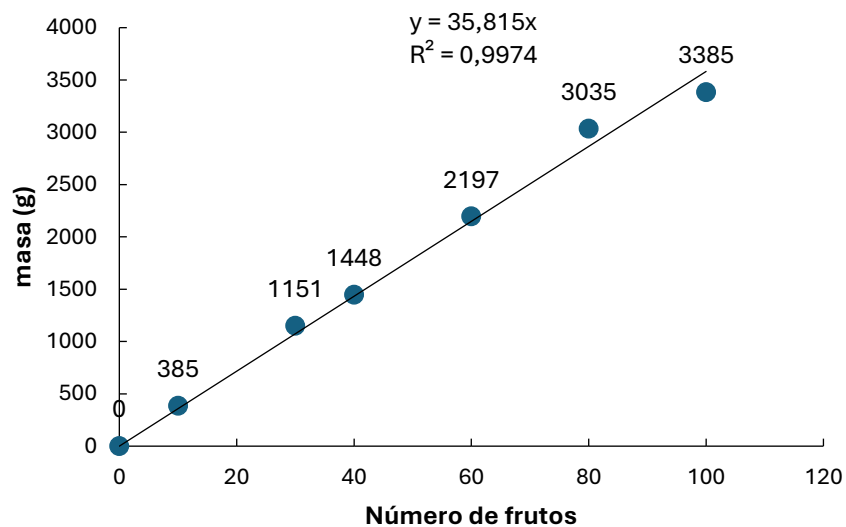
## 4. Análisis de Resultados y Discusión

### 4.1. Caracterización morfológica

En la Figura 10 se muestra la relación entre el número de frutos y la masa total donde se muestra un ajuste lineal cercano a 1 ( $R^2 = 0,9974$ ), indicando una correspondencia directa entre ambas variables. La pendiente de la recta refleja un peso promedio de 35,82 g por fruto, lo que representa la uniformidad en el tamaño y masa de los frutos de macauba, (Vargas-Carpintero et al., 2021).

#### Figura 10.

*Peso promedio del fruto.*



#### 4.1.1. Partes del fruto

En la Tabla 1 se observa la proporción en porcentaje de las diferentes partes del fruto de macauba, este se compone de cuatro partes, epicarpio, mesocarpio, endocarpio y endosperma. La mayor proporción de fruto corresponde al mesocarpio donde se encuentra contenido el aceite de interés. Las bajas desviaciones estándar (0,01–0,03) indican una alta homogeneidad entre las muestras, reflejando consistencia en la estructura del fruto. En conjunto, los resultados reflejan

una composición estable, donde las proporciones obtenidas se encuentran dentro de los rangos reportados en la literatura para esta especie (Motoike & Hilger, 2024).

**Tabla 1.**

*Proporciones de las diferentes partes del fruto.*

<b>Estadístico</b>	<b>% Epicarpio</b>	<b>% Mesocarpio</b>	<b>% Endocarpio</b>	<b>% Endosperma</b>
<b>Media</b>	20,90%	38,27%	29,14%	11,69%
<b>Desv estándar</b>	0,02	0,03	0,03	0,01
<b>Mediana</b>	21,27%	38,79%	28,86%	11,67%
<b>Mínimo</b>	17,68%	31,08%	24,34%	8,25%
<b>Máximo</b>	24,44%	43,02%	35,55%	15,73%

#### **4.1.2. Diámetro y esfericidad**

En la Tabla 2 se presenta el resumen estadístico de las mediciones de diámetro y esfericidad del fruto de macauba, los datos revelan una variabilidad moderada en el tamaño, siendo el diámetro longitudinal el que muestra una dispersión ligeramente mayor; además, el índice de esfericidad promedio de 0,80 evidencia que los frutos presentan una tendencia esférica. La desviación estándar del índice de 0,13 y su rango de 0,53–1,23 reflejan la coexistencia de frutos más alargados y otros más anchos, lo que sugiere una heterogeneidad morfológica natural, posiblemente asociada a diferencias en las condiciones de crecimiento o grado de madurez. En general, los resultados describen una población de macauba con morfología predominantemente esférica, lo cual coincide con lo reportado en la literatura, donde se menciona que estos frutos presentan poca variación entre las dimensiones verticales y horizontales debido a su forma casi esférica (Vargas-Carpintero et al., 2021).

**Tabla 2.**

*Resumen estadístico de las mediciones de diámetro y esfericidad.*

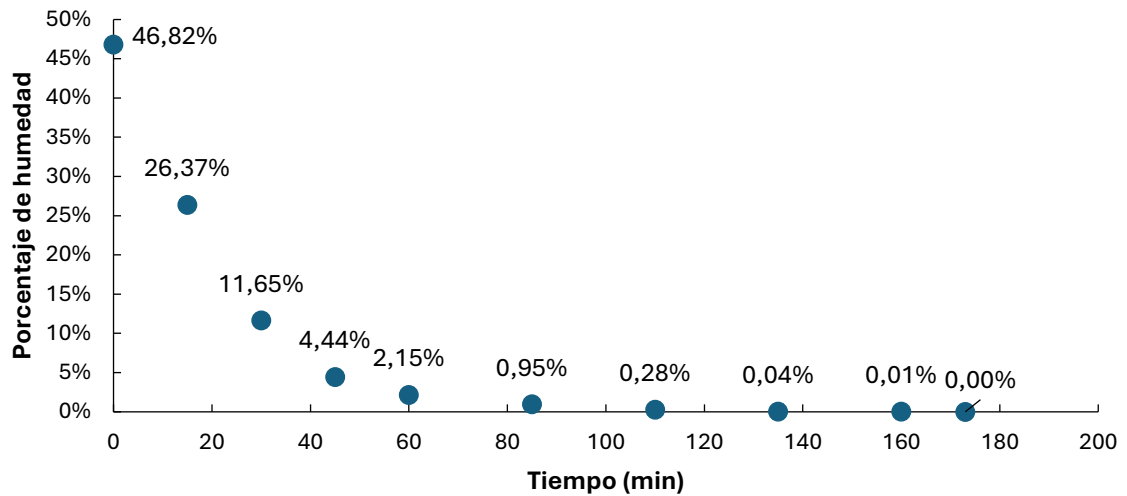
<b>Estadístico</b>	<b>Diámetro longitudinal</b>	<b>Diámetro transversal</b>	<b>Esfericidad</b>
<b>Media</b>	33,18	41,79	0,80
<b>Desv. estándar</b>	4,67	3,72	0,13
<b>Mediana</b>	33,93	42,03	0,82
<b>Mínimo</b>	23,50	25,78	0,53
<b>Máximo</b>	44,01	48,92	1,23

#### **4.2. Contenido de agua del mesocarpio**

En la Figura 11 se detalla la curva de evolución de la humedad del fruto de macauba en el tiempo, donde se observa que el proceso de secado permitió determinar que el mesocarpio del fruto de macauba presenta una humedad total del 46%, valor coherente con lo reportado para frutos frescos de esta especie (Vargas-Carpintero et al., 2021). La curva muestra que el mesocarpio pierde agua rápidamente al principio, luego el secado se desacelera y se vuelve casi plana, lo que indica que la superficie del sólido está cubierta por una delgada capa de agua líquida (conocida como humedad libre) que se evapora fácilmente al no estar químicamente unida al material (Treybal, 1988). Durante este periodo, la humedad se redujo progresivamente: al minuto 15 alcanzó un 25%, al minuto 18 descendió al 18% y al minuto 33 llegó a un 9%.

**Figura 11.**

*Curva de evolución de la humedad en el tiempo.*

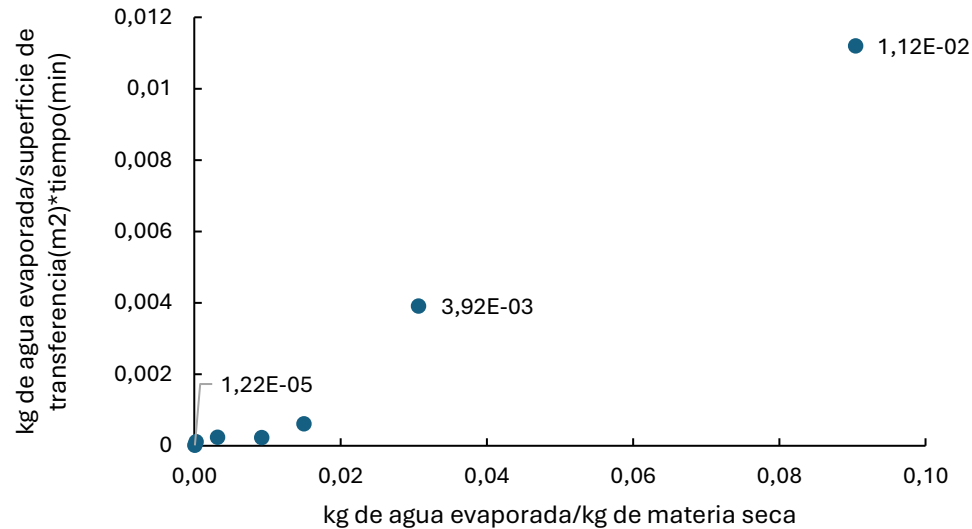


**4.2.1. Curva de secado**

En la Figura 12 se observa la curva característica de secado del mesocarpio, la pendiente inicial es máxima, no se observa un tramo de rapidez constante. Esta ausencia puede deberse a que la fase de velocidad constante concluyó antes de los 15 min o que no existió. El fruto pudo haber entrado directamente en régimen difuso desde el  $t=0$ . A partir del primer dato, el secado pasó a la fase de rapidez decreciente, debido al movimiento del frente de secado desde la superficie hacia el interior del fruto, esencialmente por fenómenos de capilaridad y difusivos donde aparecen puntos secos en la superficie y, finalmente, la velocidad de secado queda controlada por la velocidad de movimiento interno de la humedad a través del sólido, la cual baja rápidamente hasta alcanzar el equilibrio.

**Figura 12.**

*Curva característica de secado del mesocarpio.*



#### 4.3. Potencial de aceite del mesocarpio del fruto de Macauba

En la Tabla 3 se encuentran los datos del potencial de aceite de macauba el cual se identificó por medio del método Soxhlet. Se incluyen los valores de masa de las diferentes fracciones del fruto (epicarpio, nuez y mesocarpio), los cuales fueron necesarios para el cálculo del rendimiento del aceite en base húmeda, base seca y respecto al fruto total. El rendimiento obtenido mediante extracción Soxhlet refleja un alto contenido lipídico en el mesocarpio de macauba. Sin embargo, el rendimiento global del fruto (9 %) evidencia que solo una fracción del fruto aporta aceite, por lo que el aprovechamiento integral dependerá del manejo de los subproductos no oleaginosos. El aceite obtenido fue de 41,30 % en base seca, valor que se encuentra dentro del rango reportado en la literatura (17% y 78%) para el mesocarpio de macauba, (Motoike & Hilger, 2024). Este resultado indica que el material evaluado presenta un potencial oleaginoso representativo. Alfaro-Solís et al. (2020) demostraron que los frutos de macauba presentan una elevada variabilidad en parámetros biométricos y en el contenido de aceite de la

pulpa. Esta variabilidad se atribuye principalmente a la heterogeneidad genética de la especie, característica de cultivos no domesticados, mientras que los factores ambientales actúan como moduladores de la expresión fenotípica. El mesocarpio de macauba representó el 38,27 % del fruto total, lo que refleja una proporción de tejido oleaginoso menor que en especies altamente domesticadas. En comparación, la palma africana (*Elaeis guineensis*) presenta mesocarpios que constituyen entre 74 % y 82 % del fruto, con contenidos de aceite en base húmeda de 50 % a 63 % y en base seca de 74 % a 82 % (Durán et al., 2004; Caballero et al., 2022; Prada Chaparro & Romero Angulo, 2012).

### Tabla 3.

*Potencial de extracción de aceite del mesocarpio del fruto de macauba*

<b>Rendimiento en base húmeda</b>	22,02 %
<b>Rendimiento en base seca</b>	41,30 %
<b>Peso del epicarpio</b>	160,489 g
<b>Peso de nuez (Endocarpio+Endosperma)</b>	352,203 g
<b>Peso mesocarpio húmedo</b>	346,081 g
<b>Peso fruto total</b>	828,436 g
<b>Aceite total</b>	76,23 g
<b>Rendimiento del fruto total</b>	9,20 %

En la Figura 13 se observa el mesocarpio triturado antes y después del secado previo a la extracción Soxhlet.

### Figura 13.

*Mesocarpio triturado a) antes del secado b) después del secado.*



#### **4.4. Vía húmeda**

##### ***4.4.1. Prueba preliminar***

Para esta prueba se usó esterilización del fruto fresco a una presión de 27 psi y temperatura de 130 °C por 30 min aproximadamente, a estas condiciones los frutos no presentaron un estado de cocción adecuado, manifestado por una textura blanda al tacto, pero no suficiente para determinar que se habían esterilizado correctamente. La diferencia en el grado de ablandamiento entre los tres grupos resultó mínima, lo que sugiere que se logró un nivel de cocción homogéneo en todos los casos. Este resultado indica que, independientemente de la presencia del epicarpio, la transferencia de calor hacia el interior del fruto fue efectiva, pero no suficiente para el objetivo deseado. La literatura sugiere que la vía húmeda puede mejorarse integrando tecnologías emergentes que permitan un mejor control en el proceso de ablandamiento mientras se preservan las características del aceite, para otros frutos se usa pre tratamiento enzimático, ultrasonido o esterilización (HTST- High Temperature Short Time) (Ultrasonics, 2025).

##### ***4.4.2. Desarrollo experimental***

Los resultados obtenidos en la prueba preliminar indica que las condiciones usadas no son suficientes para que el fruto llegue al estado térmico deseado para extraer el aceite, por esto se decide usar la máxima temperatura (134 °C) y presión (32 psi) que maneja el equipo y se prueba aumentando el tiempo de cocción (80 min) como variable independiente. Tras la esterilización el epicarpio se vuelve más frágil y se desprende con facilidad, en cambio el mesocarpio, al estar húmedo, adquiere mayor adherencia, lo que dificulta el despulpado y deja mayor cantidad de producto adherido a la pepa.

Aunque se usaron las condiciones máximas del equipo y al aumentar el tiempo, el fruto se quemó, lo que implica un aceite de baja calidad, como se ve en los resultados de la humedad y la acidez, presentes en la Tabla 4. Es por eso que la vía húmeda no es la mejor ruta para el proceso de extracción de aceite de macauba.

**Tabla 4.**

*Resultados de rendimiento y calidad de la extracción de aceite de macauba por vía húmeda*

Condiciones		Peso (g)		%Aceite/mesocarpio seco		Calidad		
Esterilización		Prensado	mesocarpio o húmedo	Aceite	Rendimiento %	Humedad	Acidez	
Temperatura (°C)	130	Presión (psi)	1422,33	98,6	8,8	8,9	0,3	11,1
Presión (psi)	32		711,167	62,5	5,9	9,5	0,7	15
Tiempo (minutos)	45							
Temperatura (°C)	134	Presión (psi)	1422,33	197,4	14,6	7,4	0,5	22,7
Presión (psi)	32		711,167	91,3	6,2	6,8	1,2	22,3
Tiempo (minutos)	80							

El proceso de extracción genera rendimientos bajos e insatisfactorio, que revelan que el proceso es muy sensible a las pequeñas variaciones operativas y a la interacción entre la esterilización y prensado, sin que se observe una correlación directa con el nivel de presión, temperatura y tiempo aplicado. Con un rendimiento máximo de 9,48 %. Además, la calidad del aceite resultó deficiente, con una acidez elevada (entre 11,11% y 22,71%) y un contenido de humedad variable (0,32% a 1,23%). La acidez crítica observada confirma una degradación de tipo oxidativo e hidrolítico, probablemente debido a las condiciones de esterilización previa, lo que puede promover la formación de compuestos indeseables. Esta degradación no solo compromete la calidad del aceite, sino que reduce su viabilidad comercial. Los resultados refuerzan la necesidad de modificar o eliminar la etapa de esterilización para este caso de estudio.

**4.5. Vía seca**

En la Tabla 5 se presentan los datos registrados durante el proceso de secado bajo condiciones específicas. La ruta de extracción más eficiente fue: 35 min de secado, 9% de humedad de mesocarpio y una presión de 1422,33 psi. Estas condiciones, fueron las que mostraron el mayor rendimiento de aceite y la mejor respuesta mecánica durante el prensado. Un contenido de humedad inicial del 9% indica un punto de equilibrio preciso, en la estructura física del material para facilitar la extracción mecánica, (Baquero Franco, J. 1988). La aplicación de una alta presión es el factor mecánico decisivo, que genera las fuerzas de cizallamiento necesarias para colapsar completamente los compartimentos celulares que almacenan el aceite, incrementando así el rendimiento. Desde la perspectiva de la calidad, la baja humedad y acidez en el aceite es un resultado directo del eficiente secado. Por lo tanto, esta condición no solo aumenta la cantidad de aceite extraído, sino que garantiza un producto de calidad.

**Tabla 5.**

*Resultados de rendimiento y calidad de la extracción de aceite de macauba por vía seca.*

Condiciones			Peso (g)		%Aceite/mesocar pio seco		Calidad		
Secado a 120 °C		Prensado	Mesocar pio húmedo	Mesocarpio seco	Aceit e	Rendimie nto %	Humed ad	Acidez	
Tiempo (minutos)	35	Presión (psi)	1422,33	242,6	133,8	19,0	14,2	0	1,6
%Humedad mesocarpio	9		711,167	162,3	89,5	4,9	5,5	0,5	1,4
Tiempo (minutos)	24	Presión (psi)	1422,33	221,8	117,8	22,6	19,2	0,8	2,7
%Humedad mesocarpio	18		711,167	174,7	92,8	14,6	15,7	-	-
Tiempo (minutos)	15	Presión (psi)	1422,33	230,3	168,1	6,4	3,8	1,7	2,5
%Humedad mesocarpio	25		711,167	171,7	133,3	3,7	2,8	0,9	2,0

#### 4.5.1. Composición del fruto

En la Tabla 6 se presentan los resultados de composición del nuevo fruto fresco empleado para extraer el aceite. Se utilizó una prensa hidráulica nueva, operando a 120 °C y 3400 psi, y se mantuvo el proceso por vía seca. El rendimiento obtenido fue de 2,4% respecto al fruto total. Este valor bajo probablemente se deba a que la prensa podría no haber sido la adecuada para el proceso o para el tipo de fruto, también pudo influir el tipo de tela filtrante (dril super ocho). Ya que, aunque se aumentó considerablemente la presión los resultados no mejoraron.

**Tabla 6.**

*Composición y rendimientos del fruto fresco de macauba para la extracción de aceite por vía seca.*

Condiciones de operación	Secado a 120 °C
	Presión 3400 psi
Peso de fruto entero	8385 g
Peso del epicarpio	1801 g
Peso de nuez (endocarpio + endosperma)	2300 g
Peso de los frutos dañados	1214 g
Peso de mesocarpio Húmedo	3070 g
Peso de mesocarpio seco	1821 g
Aceite extraído	196 g
Aceite perdido en el proceso	61 g
Rendimiento en base seca	11 %
Rendimiento en base húmeda	6 %
Rendimiento respecto fruto total	2,4 %

#### 4.6. Caracterización fisicoquímica

En la Tabla 7 se observa un DOBI bajo, típico de lotes ricos en carotenos intactos con hidrólisis moderada; la lipasa residual actúa sobre la fase oleosa mientras los pigmentos permanecen protegidos por la matriz fibrosa del mesocarpio, lo que dificulta refinar el aceite hasta obtener un color Lovibond bajo (Urueta, 2007) (Analytik Jena, 2021). El índice de acidez sugiere que no presentan signos de degradación por hidrólisis. Por otro lado, el índice de peróxidos por

debajo del umbral de rechazo (10) descarta la oxidación acelerada (Barba, 2016). El índice de saponificación arrojó un valor dentro del rango esperado para aceites vegetales con predominio de ácidos grasos de cadena media (C16–C18), este aceite está compuesto principalmente por triglicéridos típicos de palmas oleaginosas (Rossell, 2001). Un índice de saponificación alto indica cadenas más cortas o mayor número de grupos éster por gramo, lo cual es normal en aceites de frutos tropicales (Codex Alimentarius, 2025). De igual manera, el resultado del índice de yodo indica que el aceite es semi- seco, con buen equilibrio entre estabilidad y flexibilidad. Y el parámetro del fósforo muy bajo indica presencia mínima de fosfolípidos (lecitinas). Esto es favorable porque reduce la formación de gomas durante el refinado, mejora la estabilidad térmica y claridad del aceite y es ideal para biodiésel (Barba, 2016).

**Tabla 7.**

*Resultados de análisis fisicoquímico del aceite de macauba.*

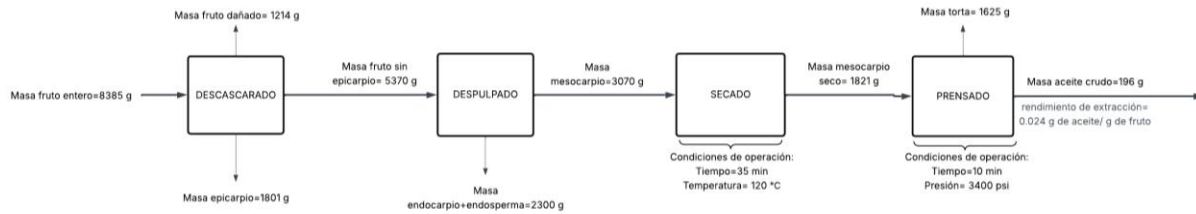
PARÁMETRO	UNIDAD	RESULTADO	TÉCNICA/NORMA	EVALUACIÓN
<b>DOBI</b>	-	2,1	Espectrofotométrico / ISO 17932:2011	ACEPTABLE
<b>Índice de acidez</b>	mg KOH/ g de muestra	1,76	Volumetría / NTC 218:2011	BUENO
<b>Índice de peróxido</b>	meq O <sub>2</sub> / kg muestra	6,5	Volumetría / NTC 236:2024	BUENO
<b>Índice de saponificación</b>	mg KOH/ g de muestra	195,15	Volumetría / NTC 335:2021	BUENO
<b>Índice de yodo</b>	g I <sub>2</sub> /100 g de muestra	95,09	Volumetría / NTC 283:2019	ALTO
<b>Fósforo</b>	g/100 g de muestra (%)	0,0019	Espectrofotometría UV-Vis / NTC 4790:2019	MUY BUENO

#### 4.7. Ruta de extracción de aceite de macauba

En la Figura 14 se presenta el diagrama del proceso, en el cual se incluyen los balances de masa, las etapas involucradas y el rendimiento obtenido para la vía seca.

**Figura 14.**

*Diagrama de bloques del proceso de extracción de aceite por vía Seca.*



Con base en los resultados obtenidos, se definió la ruta que permitió alcanzar la mejor relación entre rendimiento y calidad del aceite. El rendimiento respecto al fruto fue de 0,024 g de aceite/g de fruto, el cual se ubica por debajo del potencial, debido a que, como se explicó previamente, existieron limitantes asociadas a la prensa y a la tela filtrante.

## 5. Conclusiones

En el análisis de las propiedades morfológicas del fruto se pudo confirmar un potencial oleaginoso representativo, ya que el contenido de aceite del mesocarpio presentó un rendimiento de 41,30 % en base seca y 22,02 % en base húmeda, mientras que el rendimiento respecto al fruto total fue de 9,20 %, evidenciando que solo una fracción del fruto contribuye a la obtención de aceite. Así mismo, el análisis permitió determinar una masa promedio de 35,82 g. La composición indicó que el mesocarpio representó, en promedio, el 38,27%, valor que se encuentra por debajo de oleaginosas domesticadas. Los frutos presentaron un índice de esfericidad promedio de 0,80, lo que evidencia una morfología predominantemente esférica con variabilidad moderada. En conjunto, estos resultados muestran la influencia directa de la proporción de mesocarpio en el aprovechamiento global del aceite e indican las limitaciones en el rendimiento total frente a especies domesticadas.

La evaluación de la ruta de extracción por vía húmeda, mediante la variación del tiempo de esterilización y la presión en el prensado, mostró rendimientos bajos, con un valor máximo de 9,48 %, sin que se observara una correlación clara con las variables de presión, temperatura y tiempo evaluadas. Además, el aceite obtenido por esta ruta presentó una calidad deficiente, caracterizada por valores elevados de acidez (entre 11,11 % y 22,71 %) y contenidos de humedad variables (0,32 % a 1,23 %), lo que evidencia procesos de degradación y rendimientos bajos asociados a las condiciones de esterilización aplicadas.

La evaluación de la ruta de extracción por vía seca, mediante la variación del tiempo de secado y la presión en el prensado, mostró un mejor desempeño cuando el mesocarpio fue secado. Bajo estas condiciones se obtuvieron los mayores rendimientos sobre mesocarpio seco (hasta 19,15 %) y un aceite con baja acidez (1,56 mg KOH/g) y ausencia de humedad. No obstante, el

incremento de la presión hasta 3400 psi no mejoró el rendimiento respecto al fruto total, lo que evidencia limitaciones mecánicas del sistema de prensado utilizado.

La caracterización fisicoquímica del aceite obtenido indicó un valor de DOBI de 2,1, un índice de acidez de 1,76 mg KOH/g y un índice de peróxidos de 6,5 meq O<sub>2</sub>/kg, parámetros que evidencian una adecuada estabilidad y ausencia de oxidación acelerada. El índice de saponificación de 195,15 mg KOH/g confirmó la presencia predominante de triglicéridos característicos de aceites de palmas oleaginosas, mientras que el índice de yodo de 95,09 g I<sub>2</sub>/100 g clasificó al aceite como semiseco, con un equilibrio entre estabilidad y grado de insaturación. Finalmente, el bajo contenido de fósforo (0,0019 %) indicó una presencia mínima de fosfolípidos, lo que favorece su procesamiento y amplía su potencial de aplicación industrial.

Con base en la comparación de las rutas de extracción mecánica evaluadas a escala laboratorio, se concluye que la vía seca, mediante secado del mesocarpio en horno y posterior prensado, constituye la ruta más adecuada para la extracción de aceite de macaúba en términos de rendimiento y calidad fisicoquímica del aceite obtenido. En esta ruta se pudo alcanzar los mayores rendimientos, particularmente bajo condiciones de 35 min de secado hasta una humedad cercana al 9%, además de generar un aceite con baja acidez. En contraste, la vía húmeda, basada en la esterilización del fruto en autoclave, presentó rendimientos bajos e inconsistentes y produjo aceites con altos valores de acidez y humedad. En este sentido, los resultados obtenidos permiten proponer la vía seca como una ruta básica de extracción de aceite de macaúba a escala laboratorio.

## 6. Recomendaciones

A partir de lo investigado durante este trabajo, se recomienda que, en futuros estudios, se tenga en cuenta el grado de maduración del fruto de macaúba, ya que esta variable influye directamente en los rendimientos de extracción y en la calidad del producto.

Es importante llevar un registro más detallado de la procedencia del fruto, considerando la región, la época de cosecha, el número de palmas de donde proviene y la forma de recolección, ya sea del suelo o directamente del árbol, con el fin de reducir la variabilidad de los resultados. Y siempre que sea posible, el fruto se recolecte y se transporte en racimo completo, dado que la mayoría de los rendimientos reportados en la literatura se expresan con base en esta unidad.

Por último, se sugiere evaluar el uso de sistemas de prensado más cercanos a los empleados a nivel industrial, como las prensas tipo Speller, debido a las limitaciones encontradas con la prensa hidráulica, lo que podría mejorar la eficiencia y la consistencia del proceso de extracción.

**Referencias bibliográficas.**

- Advanced BioFuels USA. (2023, noviembre 9). Embrapa and Acelen Renewables Begin Macauba Domestication for Aviation Fuel and Bioproducts. <https://advancedbiofuelsusa.info/embrapa-and-acelen-renewables-begin-macauba-domestication-for-aviation-fuel-and-bioproducts>
- Alfaro-Solís, J. D., Montoya-Arroyo, A., Jiménez, V. M., et al. (2020). Acrocomia aculeata fruits from three regions in Costa Rica: an assessment of biometric parameters, oil content and oil fatty acid composition to evaluate industrial potential. *Agroforest Systems*, 94, 1913–1927. <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00511-8>
- Analytik Jena. (2021). AppNote UV-Vis Palm oil: DOBI & carotene (ISO 17932:2011). [https://www.analytik-jena.com/import/assets/12797892\\_AppNote\\_UVVis\\_0006\\_Palmoil\\_SPECORD\\_en.pdf](https://www.analytik-jena.com/import/assets/12797892_AppNote_UVVis_0006_Palmoil_SPECORD_en.pdf)
- Baquero Franco, J. (1988). Extracción de aceite de semillas oleaginosas. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Servicio de Extensión Agraria.
- Barba, S. E. (2016, agosto 22-24). Incidencias de la calidad del aceite en el proceso de desodorización [Presentación de conferencia]. II Congreso Palmero C//PAL, La Antigua Guatemala, Guatemala. <https://www.grepalma.org/wp-content/uploads/2018/09/AI-M1.-EE3-INCIDENCIAS-DE-LA-CALIDAD-DEL-ACEITE-EN-PROCESO-DESODORIZACION-Samuel-Barba.pdf>

Caballero Blanco, K., Ospina Gallo, M., Cortés Barrero, I., & García Núñez, J. A. (2022). Medición del potencial industrial de aceite en racimos de fruta fresca utilizando la metodología masa que pasa al digestor (MPD). Cenipalma. <https://www.cenipalma.org>

Codex Alimentarius. (2025). Norma para aceites vegetales especificados (Norma CXS 210-1999, adoptada en 1999, revisada en 2001, 2003, 2009, 2017, 2019, enmendada en 2005, 2011, 2013, 2015, 2017, 2019, 2021, 2022, 2023 y 2024, corregida en 2025). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) / Organización Mundial de la Salud (OMS). [https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/sh-proxy/en/?lnk=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252Fstandards%252FCXS%2B210-1999%252FCXS\\_210s.pdf](https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/sh-proxy/en/?lnk=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252Fstandards%252FCXS%2B210-1999%252FCXS_210s.pdf)

Colombo, C. A., Chorfi Berton, L. H., Diaz, B. G., & Ferrari, R. A. (2018). Macaúba: a promising tropical palm for the production of vegetable oil. OCL, 25(1), D108.

De SPaulo, O. E. (s. f.). Por que a brasileira macaúba é a planta da vez na produção de biocombustíveis. BiodieselBR.com. <https://www.biodieselbr.com/noticias/materia-prima/macauaba/por-que-a-brasileira-macauaba-e-a-planta-da-vez-na-producao-de-biocombustiveis-261023>

Durán S., Q., Sierra R., G. A., & García N., J. A. (2004). Potencial de aceite en racimos de palma de aceite de diferente calidad y su influencia en el potencial y extracción de aceite en la planta de beneficio. Palmas, 25(especial), 501–508. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1118>

Duque, T. S., Barroso, G. M., Borges, C. E., Mendes, D. S., da Silva, R. S., Evaristo, A. B., & dos Santos, J. B. (2025). Current and future development of *Acrocomia aculeata* focused on biofuel potential and climate change challenges. *Scientific Reports*, 15, 8120.

Hielscher Ultrasonics. (2025, 9 diciembre). Ultrasonic Extraction and Preservation. [https://www.hielscher.com/es/extraction\\_01.htm](https://www.hielscher.com/es/extraction_01.htm)

INDUSTRIAS ACUÑA LTDA. (2025b, septiembre 17). Inicio - Industrias Acuña SAS. <https://inal.com.co/>

Leonardo, V. L., & Cervi, A. C. (2009). *Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd ex Mart., nova ocorrência para a flora do Estado do Paraná. *Acta Biológica Paranaense*, 38. <https://doi.org/10.5380/abpr.v38i0.16939>

Macaúba - Portal Embrapa. (s. f.). <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/agroenergia/biodiesel/materias-primas/macauba>

Motoike, S. Y., & Hilger, T. (2024). Macaúba: do plantio à colheita. *Oficina de Textos*.

Nunes, A. A., Favaro, S. P., Galvani, F., & Miranda, C. H. B. (2015). Good practices of harvest and processing provide high quality Macauba pulp oil. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 117(12), 2036–2043. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201400577>

Oliveira, C. D., Silveira, B. M. P. E., De Assis, N. F., Rios, G. R., Siqueira-Silva, A. I., Júnior, J. C. B., Viana, P. A., & Pereira, E. G. (2022). Synchronization between photosynthetic responses to seasonality during fruit development and fatty acid profile of mesocarp oil in macauba (*Acrocomia aculeata*). *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 43, 102423. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2022.102423>

¡Planterista! (2023, 3 noviembre). Coyol -- *Acrocomia aculeata* - ¡Planterista! <https://planterista.com/plantas/coyol-acrocomia-aculeata/>

Prada Chaparro, F., & Romero Angulo, H. M. (2012). Muestreo y análisis de racimos en el cultivo de la palma de aceite. Corporación Centro de Investigación en Palma de Aceite (Cenipalma). <https://repositorio.fedepalma.org/handle/123456789/107697>

Rossell, J. B. (2001). Fats and Oils: Functional Properties. En F. D. Gunstone (Ed.), *Rossell's lipid handbook* (3.<sup>a</sup> ed., pp. xx-xx). CRC Press.

TREYBAL, R. E. (1988). *OPERACIONES DE TRANSFERENCIA DE MASA* (2.<sup>a</sup> ed.). McGraw-Hill.

Urueta, J. C. (2007). Implementación del DOBI como parámetro de calidad en extractoras de aceite de palma. *Palmas*, 28(3), 17–27. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1301/1301>

Vargas-Carpintero, R., Hilger, T., Mössinger, J., Souza, R. F., Barroso Armas, J. C., Tiede, K., & Lewandowski, I. (2021). *Acrocomia* spp.: neglected crop, ballyhooed multipurpose palm or fit for the bioeconomy? A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 41(6). <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00729-5>

Vista de Clarificación estática reducida. (s. f.). <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1299/1299>

WWF & International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA). (2024). Sustainable aviation fuels (SAF) potential, costs and sustainability in South America: A roadmap for major producers Argentina, Brazil, and Colombia. IIASA. [https://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/20207/1/IIASA-WWF\\_Sustainable-Aviation-Fuels\\_South-America.pdf](https://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/20207/1/IIASA-WWF_Sustainable-Aviation-Fuels_South-America.pdf)

Zimmer, A., & de Andrade, R. (2021, abril). Macaw's path to sustainable aviation fuel: A Brazilian case study. Documento presentado en la 29th EU International Conference on Biofuels, Virtual Conference. [https://www.safmaps.com/pdfs/Macaw\\_paper\\_29th\\_EU\\_Conference\\_2021.pdf](https://www.safmaps.com/pdfs/Macaw_paper_29th_EU_Conference_2021.pdf)