

Extracción asistida por ultrasonido de compuestos fenólicos a partir de pseudotallo de plátano(*Musa spp.*) y cáscara de cacao (*Theobroma cacao.*) y su evaluación comparativa de la actividad antioxidante y contenido fenólico

Kevin Arley Gomez Carvajal

Directora

Andrea Paola Aparicio Sánchez

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingenierías ECBTI

Ingeniería de Alimentos

2026

Nota de Aceptación

Nombre Director de Trabajo de Grado

Jurado

Jurado

Agradecimientos

A todas las personas que me han acompañado y apoyado en este proyecto de vida, expreso mi más sincero agradecimiento:

En primer lugar, a mi Nona Adela, quien desde el cielo sigue siendo mi guía y mi fortaleza. su amor y su presencia me impulsaron a nunca rendirme.

A mis padres, Arley Gómez González y Slendy Carvajal Duarte, a mi hermana Eris Natalia Gómez Carvajal, a mi pareja Diana Margarita Sepúlveda Cazarán les dedicó este logro con todo mi cariño. Su amor incondicional, apoyo emocional y motivación constante fueron el pilar que sostuvo mi perseverancia. Cada sacrificio, palabra de aliento y muestra de fe en mí, incluso en los momentos más desafiantes, se refleja en este proyecto, que es también un triunfo suyo. No hay palabras suficientes para agradecerles todo lo que han hecho por mí.

A la empresa Indunilo SAS, en especial a mis jefes, la señora Milena Páez y el señor Alcides Molina, agradezco profundamente por su comprensión, flexibilidad y por facilitarme el tiempo e instalaciones necesarios para dedicarme a mis estudios.

Finalmente, pero no menos importante, quiero reconocer mis agradecimientos a la ingeniera Martha Barrera Hernández, al profesor Eduart Andrés Gutiérrez Pineda y a la investigadora y directora del proyecto, Andrea Paola Aparicio Sánchez, quienes con generosidad compartieron sus conocimientos y experiencia académica. Su guía sabia y su apoyo constante fueron fundamentales para la realización de este proyecto de grado. Valoro inmensamente cada consejo, oportunidad y motivación que me brindaron para seguir adelante y no desfallecer en el proceso.

"El único límite para nuestros logros de mañana está en nuestras dudas de hoy."

- Franklin Delano Roosevelt

Resumen

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar la extracción asistida por ultrasonido de compuestos fenólicos a partir del pseudotallo de plátano (*Musa spp.*) y de la cáscara de cacao (*Theobroma cacao*), con el fin de comparar su composición proximal, rendimiento de extracción y actividad antioxidante, así como su potencial de valorización en el marco de la sostenibilidad. Los resultados evidenciaron diferencias significativas entre ambas matrices, destacándose la cáscara de cacao por su mayor contenido de proteínas, grasas y cenizas. En cuanto al contenido de compuestos fenólicos totales, determinado mediante el método de Folin-Ciocalteu, la cáscara de cacao presentó un valor de 1,65 mg GAE/g, superior al del pseudotallo de plátano (0,50 mg GAE/g). Durante el proceso de extracción asistida por ultrasonido, la cáscara de cacao presentó un mayor rendimiento de recuperación de masa (67,875%) a pH 5,0 y 120 minutos, en comparación con el pseudotallo de plátano (55,910%), lo cual se atribuye a su mayor proporción de compuestos solubles. En relación con la actividad antioxidante, evaluada mediante los ensayos DPPH y ABTS, la cáscara de cacao mostró los valores más altos, alcanzando un 90,49% de inhibición en DPPH y 0,1198 mol TE/g en ABTS, mientras que el pseudotallo de plátano registró 42,68% y 0,1087 mol TE/g, respectivamente. Asimismo, se determinó que las condiciones óptimas de extracción corresponden a pH ácido (3,0) y tiempos moderados (30–60 minutos), favoreciendo la estabilidad y liberación de compuestos bioactivos.

Palabras clave: Antioxidantes, Compuestos fenólicos, Extracción Asistida por Ultrasonido, Residuos agroindustriales.

Abstract

The present study aimed to evaluate the ultrasound-assisted extraction of phenolic compounds from banana pseudostem (*Musa spp.*) and cocoa husk (The present study aimed to evaluate the ultrasound-assisted extraction of phenolic compounds from banana pseudostem (*Musa spp.*) and cocoa husk (*Theobroma cacao*), in order to compare their proximate composition, extraction yield, and antioxidant activity, as well as their potential for valorization within a sustainability framework. The results showed significant differences between the matrices, with cocoa husk standing out for its higher protein, fat, and ash content. Regarding total phenolic content, determined by the Folin–Ciocalteu method, cocoa husk reached 1.65 mg GAE/g, higher than that of banana pseudostem (0.50 mg GAE/g). During the ultrasound-assisted extraction process, cocoa husk exhibited a higher mass recovery yield (67.875%) at pH 5.0 and 120 minutes than banana pseudostem (55.910%), attributed to its higher proportion of soluble compounds. In terms of antioxidant activity, as evaluated by DPPH and ABTS assays, cocoa husk showed the highest values, with 90.49% inhibition in DPPH and 0.1198 mol TE/g in ABTS, while banana pseudostem recorded 42.68% and 0.1087 mol TE/g, respectively. Additionally, it was determined that the optimal extraction conditions correspond to acidic pH (3.0) and moderate times (30–60 minutes), favoring the stability and release of bioactive compounds.

Keywords: Antioxidants, Phenolic Compounds, Ultrasound-Assisted Extraction, Agro-industrial wastes.

Tabla de Contenido

Introducción	11
Justificación	13
Objetivos.....	16
Objetivo General.....	16
Objetivos Específicos	16
Marco Teórico.....	17
Metodología	27
Selección y Preparación de la Materia Prima	27
Caracterización de Materias Primas	27
Determinación de Humedad	27
Determinación de Cenizas	28
Determinación de Proteína Cruda.....	28
Determinación de Grasa Cruda.....	29
Acondicionamiento de la Materias Primas	29
Extracción de Compuestos Fenólicos.....	30
Determinación del Contenido de Compuestos Fenólicos.....	30
Determinación de Actividad Antioxidante	31
Resultados y Discusión.....	34
Selección y Preparación de la Materia Prima	34
Caracterización de Materias Primas	39
Acondicionamiento de Materias Primas.....	41
Extracción de Compuestos Fenólicos.....	42

Determinación de Actividad Antioxidante	45
Conclusiones	50
Recomendaciones	52
Referencias Bibliográficas	53
Apéndices.....	61

Lista de Figuras

Figura 1 <i>Ciclo de la economía circular</i>	18
Figura 2 <i>Partes de la planta de plátano</i>	20
Figura 3 <i>Partes del fruto del cacao</i>	22
Figura 4 <i>Estructura de los principales flavonoides</i>	24
Figura 5 <i>Representación equipo de extracción asistida por ultrasonido (EAU)</i>	25
Figura 6 <i>La reacción redox y la variación de color en el ensayo de Folin-Ciocalteu</i>	31
Figura 7 <i>Ensayos espectrofotométricos de la capacidad antioxidante</i>	33
Figura 8 <i>Etapas del procesamiento de la preparación de la cáscara de cacao</i>	35
Figura 9 <i>Etapas del procesamiento de la preparación del pseudotallo de plátano</i>	38
Figura 10 <i>Matrices vegetales después del proceso de desengrasado</i>	42

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Resultados de los análisis proximales de la muestras seca de cáscara de cacao y pseudotallo plátano.....</i>	41
Tabla 2 <i>Recuperación de masa(%) de la cáscara de cacao y pseudotallo de plátano obtenida bajo diferentes condiciones de pH y tiempo durante la extracción asistida por ultrasonido (EUA)</i>	44
Tabla 3 <i>Matriz experimental del diseño factorial 3X3 para la optimización del proceso de extracción asistida por ultrasonido de la matriz de cáscara de cacao</i>	47
Tabla 4 <i>Matriz experimental del diseño factorial 3X3 para la optimización del proceso de extracción asistida por ultrasonido de la matriz de pseudotallo de plátano.....</i>	48

Lista de Apéndices

Apéndice A <i>Registro de variables durante el proceso de secado de la cáscara de cacao</i>	61
Apéndice B <i>Reducción de peso de la cáscara de cacao durante el tiempo de secado</i>	63
Apéndice C <i>Efecto de la temperatura de secado sobre el peso de la cáscara de cacao</i>	64
Apéndice D <i>Registro de variables durante el proceso de secado de pseudotallo de plátano</i>	65
Apéndice E <i>Reducción de peso del pseudotallo de plátano durante el tiempo de secado</i>	66
Apéndice F <i>Efecto de la temperatura de secado sobre el peso del pseudotallo del plátano</i>	67
Apéndice G <i>Resultados de los análisis proximal de la cáscara de cacao</i>	68
Apéndice H <i>Resultados de los análisis proximal del pseudotallo de plátano</i>	69
Apéndice I <i>Curva de calibración para la determinación de compuestos fenólicos totales mediante el método de Folin-Ciocalteu</i>	70
Apéndice J <i>Curva de calibración del radical libre ABTS</i>	71
Apéndice K <i>Curva de calibración del radical libre DPPH</i>	72
Apéndice L <i>Horno de secado por convención modelo CE130 de la marca GUNT Hamburg</i> ...	73
Apéndice M <i>Procesador de alimentos Robot Coupé R2</i>	74
Apéndice N <i>Mufla Terrígeno M10 , Desecador</i>	75
Apéndice O <i>Fat Analyzer TT-SOX406</i>	76
Apéndice P <i>Sistema en línea de digestión del Velp Scientifica DKL 8 Heating digestion</i>	77
Apéndice Q <i>Sistema en línea de destilación automático UDK 149</i>	78
Apéndice R <i>Titulador automático TitroLine 5000</i>	79
Apéndice S <i>Baño ultrasónico BioBase Digital Ultrasonic Cleaner Digital Pro</i>	80

Introducción

Los residuos agrícolas como el pseudotallo de plátano (*Musa spp*) y la cáscara de cacao (*Theobroma cacao*) representa una fuente de compuestos bioactivos, entre ellos compuestos fenólicos y flavonoides, reconocidos por su potencial antioxidante y su aplicación en la industria alimentaria. Como desafío principal se quiere lograr una extracción de manera eficiente, ya que los métodos convencionales suelen presentar limitaciones en temas de rendimiento, tiempo, disponibilidad de solventes. En este contexto, ha surgido interés por tecnologías emergentes como la Extracción Asistida por Ultrasonido (EAU), que es una alternativa innovadora capaz de mejorar la recuperación de compuestos bioactivos sin comprometer la estabilidad de estos mismos, de igual manera promueva la economía circular y permite generar un valor agregado a los residuos agrícolas.

Los métodos convencionales de extracción de compuestos fenólicos, como la percolación, la maceración y la extracción con solventes, son simples, pero menos efectivos. Debido a esto, han surgido técnicas modernas como la Extracción Asistida por Ultrasonido (EAU), la cual consiste en la utilización de ondas ultrasónicas para inducir cavitación en el solvente, lo que provoca un incremento en la difusión de los solutos desde las matrices vegetales hacia el medio extractivo (Zhang et al., 2024). Esta tecnología es bien conocida por ser sencilla y relativamente menos costosa que otros métodos de extracción.

En este trabajo se empleó la Extracción Asistida por Ultrasonido (EAU) para extraer compuestos fenólicos de dos matrices vegetales, provenientes de subproductos agrícolas: el pseudotallo de plátano (*Musa spp*), según Islam et al. (2022), es un subproducto rico en fibra y compuestos orgánicos, incluyendo variabilidad de compuestos bioactivos, incluidos fenólicos, flavonoides y alcaloides. Por otro lado, la cáscara de cacao (*Theobroma cacao*) según Llerena et

al. (2023) es una fuente rica en flavonoides y compuestos fenólicos. Es fundamental destacar que el perfil fenólico de la cáscara de cacao puede ser comparable al del grano de cacao.

En este contexto, la extracción asistida por ultrasonido (EUA) se consolida como una técnica eficiente para obtener antocianinas a partir del pseudotallo de plátano y de la cáscara de cacao. Ambas matrices evidencian un notable potencial en términos de actividad antioxidante y de contenido de compuestos fenólicos; sin embargo, es necesario optimizar las condiciones del proceso para maximizar su rendimiento. De este modo, la comparación entre estas fuentes permite generar criterios técnicos relevantes para su aprovechamiento en el desarrollo de alimentos funcionales, destacando su valor como alternativas sostenibles en la agroindustria y sentando las bases para el desarrollo del presente estudio.

Considerando el potencial de aprovechamiento de estas matrices vegetales y la necesidad de optimizar la recuperación de sus compuestos bioactivos, surge la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo incide el proceso de extracción asistida por ultrasonido en la eficiencia de recuperación de compuestos bioactivos y antioxidantes del pseudotallo de plátano y la cáscara de cacao?

Justificación

La valorización de residuos agrícolas se ha consolidado como una estrategia para promover la sostenibilidad y la innovación en la industria alimentaria. Los subproductos como el pseudotallo de plátano (*Musa spp*) y la cáscara de cacao (*Theobroma cacao*) fueron seleccionados como matrices de estudio debido a que ambos representan residuos agroindustriales generados en grandes volúmenes y con alto potencial para la obtención de compuestos bioactivos. Durante el procesamiento del plátano, el pseudotallo constituye entre el 80% y 90% de la biomasa total de la planta, usualmente descartándolo sin aprovecharlo. De forma similar, en la industria cacaotera, la cáscara de cacao representa entre el 70% y el 75% del peso del fruto, por lo que es el principal residuo de esta industria. La magnitud de estos residuos sustenta la necesidad del desarrollo de este trabajo, dado que su aprovechamiento no solo contribuye a la reducción del impacto ambiental, sino que también permite generar valor agregado mediante alternativas de innovación biotecnológica

La selección del pseudotallo de plátano y la cáscara de cacao también se fundamenta en su contenido de compuestos fenólicos, metabolitos secundarios ampliamente distribuidos en las plantas y reconocidos por su capacidad antioxidante. Estos compuestos tienen la capacidad de neutralizar radicales libres y contribuir a la prevención de procesos oxidativos asociados con el deterioro de alimentos y diversas alteraciones biológicas, lo que ha despertado un creciente interés por su aprovechamiento en las industrias alimentaria. (Dai y Mumper, 2010). Diversos estudios han reportado la presencia de compuestos fenólicos y flavonoides tanto en el pseudotallo de plátano como en la cáscara de cacao, evidenciando su potencial como materias primas para la obtención de extractos con propiedades funcionales y antioxidantes.

El pseudotallo de plátano y la cáscara de cacao son residuos agrícolas que podrían ser valorizados como fuentes de estos compuestos bioactivos. Estudios previos han demostrado que los residuos de plátano son ricos en fibra cruda, carbohidratos y cenizas, y pueden servir como materiales basales o componentes de la alimentación animal. Además, la flor de plátano ha mostrado efectos antibacterianos y potencial en la industria de alimentos y piensos. (Salas, S. & Moscote, J. G.2023).

Para lograr una extracción eficaz y sostenible de compuestos bioactivos presentes en estas matrices, se propuso el uso de la extracción asistida por ultrasonido (EAU), que es una tecnología innovadora y sostenible que se utiliza para extraer compuestos bioactivos de diferentes matrices vegetales, su principal ventaja es mejorar la eficiencia de extracción, reducir el uso de solventes y energía, y preservar compuestos sensibles al calor.

Desde una perspectiva de sostenibilidad, el ultrasonido se reconoce como una tecnología clave en el desarrollo de procesos de extracción ecológicos y económicamente viables. Esta técnica permite reducir significativamente el tiempo de extracción, el consumo de solventes y energía, así como las operaciones unitarias y emisiones de dióxido de carbono, manteniendo una alta eficiencia en la obtención de compuestos como antioxidantes, pigmentos a partir de diversas matrices alimentarias. (Chemat et al., 2017).

La comparación entre estas matrices permitió identificar las mejores condiciones para la extracción de compuestos fenólicos y la evaluación de su actividad antioxidante. Asimismo, la aplicación de la extracción asistida por ultrasonido puede mejorar la eficiencia y selectividad del proceso extractivo, favoreciendo el aprovechamiento sostenible de estos residuos agroindustriales y generando conocimiento para el desarrollo de ingredientes funcionales con potencial aplicación en la industria alimentaria (Wardani et al., 2024).

La incorporación en matrices poliméricas biodegradables posibilita el diseño de sistemas de envasado capaces de monitorear en tiempo real las condiciones internas del producto y, simultáneamente, ejercer funciones activas de protección frente a oxidación, y así buscar una integración en los principios de la ingeniería de alimentos, la economía circular y nuevas tecnologías de conservación de alimentos.

Objetivos

Objetivo General

Valorizar residuos agrícolas mediante la extracción asistida por ultrasonido de compuestos fenólicos presentes en el pseudotallo del plátano (*Musa spp*) y la cáscara de cacao (*Theobroma cacao*), con el fin de contribuir al desarrollo de productos funcionales y fomentar la sostenibilidad en el aprovechamiento de subproductos agroindustriales.

Objetivos Específicos

Caracterizar el pseudotallo de plátano y cáscara de cacao mediante análisis proximales para determinar su potencial como fuente de compuestos bioactivos.

Analizar el efecto de la extracción asistida por ultrasonido sobre la eficiencia de recuperación de polifenoles y antioxidantes de los extractos obtenidos.

Optimizar las condiciones del proceso de extracción mediante un diseño experimental para maximizar el rendimiento de compuestos fenólicos.

Marco Teórico

Un residuo agroindustrial se define como cualquier subproducto orgánico o inorgánico generado durante las etapas de producción, procesamiento, almacenamiento o distribución de productos agrícolas, estos residuos pueden incluir partes de plantas utilizadas (como tallos, cáscaras). La composición de estos residuos principalmente de celulosa, hemicelulosa, lignina, proteínas, grasas y minerales, lo que las convierte en matrices con alto potencial para la recuperación de compuestos bioactivos tales como fenoles y antioxidantes naturales. (Kammoun et al., 2020). Desde un punto de vista ambiental, el aprovechamiento de estos compuestos mediante tecnologías de extracción sostenibles contribuye a la reducción de desechos orgánicos que, de otro modo, generarían problemas de disposición final y emisiones de gases de efecto invernadero. Desde un ámbito económico, esta estrategia permite transformar un residuo en un recurso de valor agregado. La revalorización de estos residuos agroindustriales es un enfoque clave dentro de la economía circular, transformando lo que antes se consideraba un problema en materia prima.

De acuerdo con lo anterior, la Figura 1, presenta el modelo de economía circular aplicado a los residuos agroindustriales, en el cual estos subproductos son ingresados nuevamente al sistema productivo mediante procesos de valorización. Este enfoque permite su transformación en materias primas secundarias con aplicaciones funcionales, contribuye a disminuir el impacto ambiental.

Figura 1

Ciclo de la economía circular



Fuente. Adaptado de Díaz, F. J. C. (2022).

En la producción agrícola de plátanos (*Musa spp.*), según datos de OEC, 2025, este cultivo ocupa el cuarto lugar entre los más importantes en el mundo como cultivo básico. Además, es el quinto producto agrícola más comercializado, con un crecimiento del 1,76%. Según estadísticas de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), la producción global de plátanos en 2023 fue aproximadamente de 139,6 millones de toneladas. Países como India (26,22%), China (8,64%), Indonesia (6,69%) lideraron la producción global. No obstante, Colombia, aunque ocupó la posición 14, registrando una participación del 1,83%, lo que representa una producción significativa que genera subproductos agroindustriales. A nivel nacional, la Encuesta nacional agropecuaria (ENA) del 2023 del DANE, reporta que en Colombia el área sembrada alcanzó las 305,355 hectáreas y el área cosechada fue de 196,507 hectáreas, con una producción total de 1,993,937 toneladas y un rendimiento de 10,1 %. A partir de estas cifras, se estima la generación de aproximadamente 354 millones de pseudotallos de plátano, equivalentes a cerca de 5,3 millones de toneladas de biomasa fresca, que actualmente se consideran en gran medida residuos agrícolas. En el ámbito

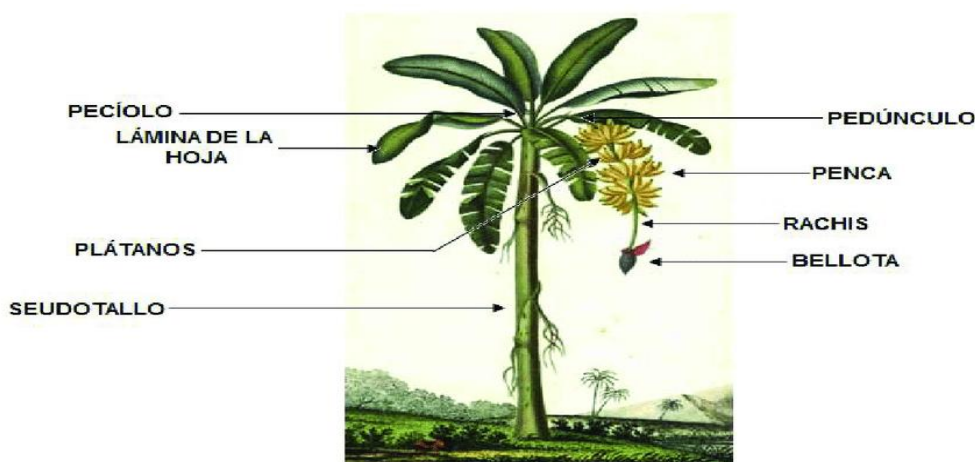
regional, el departamento de Santander ocupó el puesto 11 en producción de plátano. En esta región se registraron 7,541 hectáreas sembradas y 3,816 hectáreas cosechadas, con una producción total de 49,740 toneladas y un rendimiento de 13%. Con base en estos datos, se estima la generación de alrededor de 6,9 millones de pseudotallos, equivalentes a aproximadamente 103.000 toneladas de biomasa fresca, lo que evidencia una disponibilidad considerable de este residuo agroindustrial. El pseudotallo de plátano corresponde a la estructura herbácea que sostiene las hojas, la inflorescencia y el racimo, y está formado por la superposición de vainas foliares (Figura 2). Este tallo se comprime hasta formar este tejido herbáceo, que tiene una alta proporción de agua, tejidos fibrosos y parenquimáticos, fibras, celulosa, hemicelulosa y lignina. (Promusa, 2020). Diversos estudios han demostrado que el pseudotallo constituye una fuente importante de compuestos bioactivos, principalmente polifenoles y flavonoides. Entre los compuestos identificados se encuentran ácidos fenólicos como el gentísico, protocatecuico, cafeico y ferúlico, que contribuyen a la neutralización de radicales libres. Adicionalmente, se han descrito triterpenos, esteroides vegetales, cumarinas y proantocianidinas que exhiben propiedades antioxidantes, antimicrobianas y citoprotectoras (Kumar et al., 2014).

Las cifras de producción reportadas a nivel nacional y regional evidencian la amplia disponibilidad de pseudotallo de plátano como subproducto agroindustrial. Esta disponibilidad representa una oportunidad para su aprovechamiento mediante estrategias de valorización orientadas a la recuperación de compuestos bioactivos de interés. En este sentido, la extracción de compuestos fenólicos a partir de esta biomasa se alinea con los principios de la economía circular, al transformar un residuo agrícola en una materia prima con potencial aplicación en las industrias alimentaria. Asimismo, su aprovechamiento contribuye a la reducción de los impactos

ambientales asociados a la disposición inadecuada de residuos y puede generar nuevas oportunidades de desarrollo económico para las regiones productoras.

Figura 2

Partes de la planta de plátano



Fuente. Adaptado de Montaña et al., 2014.

Por otra parte, el cacao constituye uno de los pilares económico para muchos países, sin embargo, su producción enfrenta a innumerables desafíos relacionados con la volatilidad de los precios y el impacto ambiental derivado de la generación de residuos agroindustriales. De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2022), la producción mundial de cacao alcanzó aproximadamente 5,9 millones de toneladas, siendo Costa de Marfil el principal productor con cerca del 38% de la producción mundial, seguido de Ghana (18,87%), Indonesia (18,87%), mientras que Colombia ocupó el puesto 10 con una participación del 1,06%. En el ámbito nacional, según el reporte de la Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA) de 2023 del DANE, el cultivo de cacao registró un área sembrada de 177,990 hectáreas y un área cosechada de 147,706 hectáreas, con una producción de 61,842 toneladas, lo que implica la generación aproximada de 9,276 toneladas de cáscara de cacao como residuo. A escala regional, el departamento del Santander se consolidó como el

principal productor de cacao, con 61,126 hectáreas sembradas, 57,214 hectáreas cosechadas y una producción de 22,306 toneladas, generando un estimado de 3,346 toneladas de cáscaras de cacao, equivalentes a aproximadamente un tercio de los residuos generados a nivel nacional. Estas cifras posicionan a Santander como un territorio estratégico para el desarrollo de iniciativas orientadas a la valorización de este residuo.

Desde una perspectiva biológica y productiva, el cacao (*Theobroma Cacao L.*) es una especie *arborea* perteneciente a la familia *Malvaceae*, cultivada en regiones tropicales de América, África y Asia, principalmente se siembra óptimamente entre 0 y 1200 msnm, este cultivo posee una gran relevancia económica y social, pues constituye la base de la industria chocolatera y una fuente importante de ingresos para pequeños productores en países de desarrollo, cuyo fruto está compuesto por cáscara, mucilago y placenta, estructuras que en conjunto representan cerca del 70-75% del peso fresco, mientras que solo el 10% del peso total se destina a la comercialización, la estructura morfológica del cacao se observa en la Figura 3, donde se identifican claramente las partes que dan origen a los principales residuos del proceso productivo. La cáscara constituye el residuo más abundante y comúnmente desechado, a pesar de su alto potencial de aprovechamiento. Por ejemplo, Rojo-Poveda et al., 2020, señalan que la cáscara de cacao está conformada por tejidos fibrosos y parenquimáticos, fibra dietética, compuestos volátiles, proteínas y un amplio espectro de polifenoles, lo que le confiere propiedades bifuncionales, como actividades antibacterianas, antivirales, anticancerígenas, neuroprotectoras, antiinflamatorias y beneficios para el sistema cardiovascular.

En este contexto, el aprovechamiento de la cáscara de cacao mediante la extracción de compuestos bioactivos se presenta como una alternativa viable para la implementación de modelos de economía circular en el sector cacaotero colombiano, permitiendo reducir el impacto

ambiental asociado a la disposición de residuos y, simultáneamente, generar valor agregado y fortalecer la economía local.

Figura 3

Partes del fruto del cacao



Fuente. Adaptado de Robayo C, E. (2015).

Desde una perspectiva ambiental, la valorización de residuos agroindustriales mediante la extracción de compuestos bioactivos contribuye de manera significativa a la reducción de los desechos orgánicos, que representan un problema tanto por su inadecuada disposición final como por la generación de emisiones de gases de efecto invernadero. En el ámbito económico, este enfoque permite aportar valor agregado a materiales producidos en grandes cantidades y tradicionalmente descartados. Asimismo, desde el punto de vista biotecnológicos, la recuperación de componentes bioactivos abre nuevas oportunidades para el desarrollo de productos con aplicaciones en sectores como el alimentario, farmacéutico, y hasta para el mismo sector agrícola, fortaleciendo estrategias de aprovechamiento sostenibles.

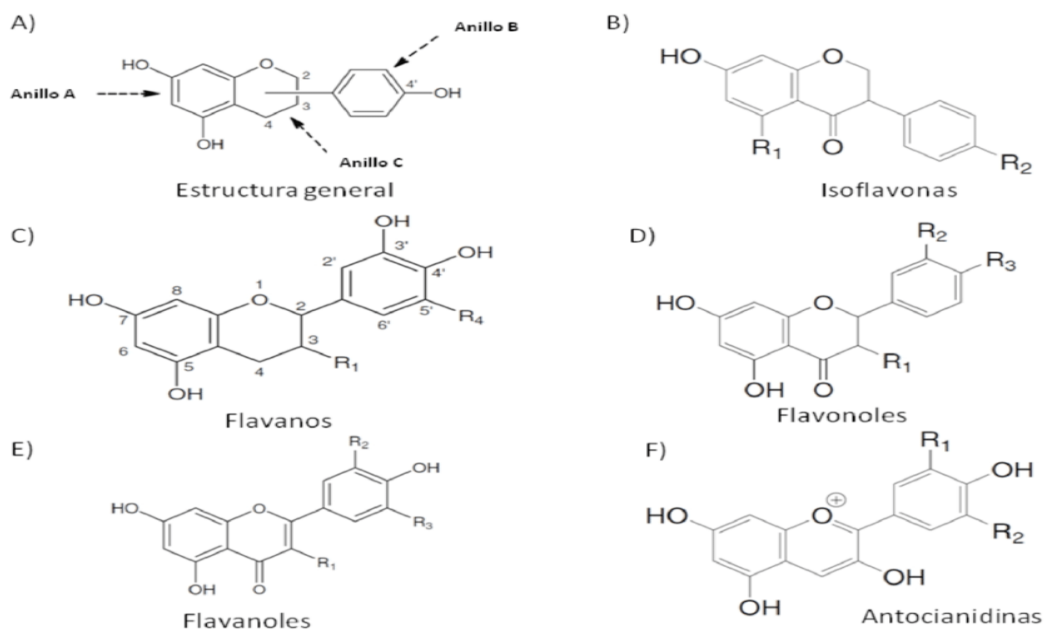
Estudios realizados por Okiyama et al. (2017)., ha demostrado que la cáscara de cacao contiene cantidades significativas de polifenoles, incluidos flavonoides y antocianinas con elevada actividad antioxidante, de igual forma, Singh et al, .2016., describe que el pseudotallo de plátano ha sido identificado como una fuente rica en fibra, en compuestos fenólicos y pigmentos, lo que lo convierte como un material promisorio para la obtención de extractos funcionales.

Los compuestos fenólicos constituyen uno de los grupos de metabolitos secundarios más abundante y ampliamente distribuidos en las plantas. Se caracterizan por poseer uno o más anillos aromáticos unidos a grupos hidroxilo y desempeñan funciones esenciales relacionadas con la defensa frente al estrés biótico y abiótico. Además, han despertado un creciente interés debido a sus propiedades antioxidantes y antimicrobianas. (Dai y Mumper, 2010).

Dentro de este grupo, los flavonoides representan uno de las familias más importantes y diversas de compuestos fenólicos. Estructuralmente, presentan un esqueleto básico de quince átomos de carbono, formado por dos anillos aromáticos unidos mediante un anillo heterocíclico que contiene oxígeno. (Martín Gordo, D. A. (2018). Las variaciones en los patrones de hidroxilación, metoxilación y glicosilación originan diferentes subclases, entre las que se incluyen flavanoles, flavanos, flavanonas, flavonoles, isoflavonas y antocianidinas. (Limón, D., et al 2010). Los flavonoides han sido ampliamente estudiados por su capacidad para actuar como antioxidantes, neutralizando especies reactivas de oxígeno y contribuyendo a la protección celular frente al daño oxidativo. Asimismo, estos compuestos poseen actividades antiinflamatoria y antimicrobiana. Debido a estas propiedades, los compuestos fenólicos y en particular, los flavonoides, han adquirido relevancia como potencial ingrediente funcional y como posible alternativa natural para el desarrollo de productos con valor agregado. (Gould, K. S.2004).

Figura 4

Estructura de los principales flavonoides



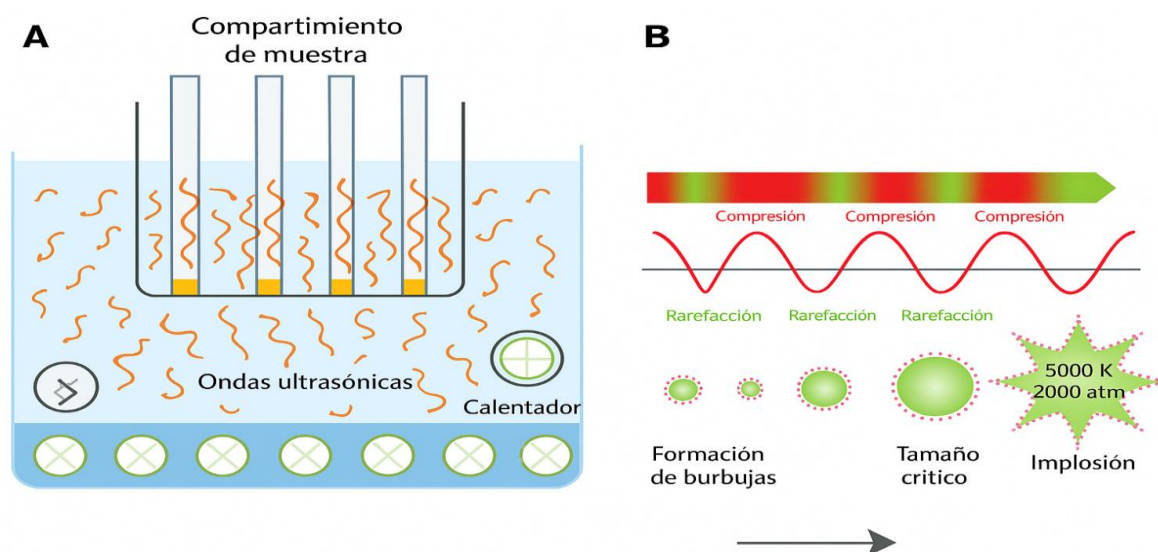
Fuente. Limón, D., et al 2010

En el contexto de la biotecnología, los subproductos agroindustriales han cobrado interés como fuentes sostenibles y de bajo costo de compuestos bioactivos. No obstante, los métodos convencionales de extracción presentan limitaciones como el alto consumo energético, el uso de solventes orgánicos contaminantes, tiempos prolongados y el bajo rendimiento en la extracción de antocianinas. (Tena, N., & Asuero, A. G. 2022). Estas desventajas han impulsado el desarrollo de tecnologías verdes como la Extracción Asistida por Ultrasonido (UAE), que mejora la eficiencia del proceso, reduce el impacto ambiental y favorece una mayor estabilidad y un mayor rendimiento de los extractos. (Tena y Asuero, 2022). La Extracción Asistida por Ultrasonido (EAU) emplea ondas ultrasónicas de altas frecuencia (20-100 kHz), que generan cavitación acústica, fenómeno responsable de la formación y colapso de microburbujas en el medio líquido. Este proceso libera energía en forma de microturbulencias, altas presiones y aumentos

localizados de temperatura, lo que debilita las paredes celulares e incrementa la transferencia de masa acelerando así la liberación de antocianinas. Como se observa en la Figura 5, esta tecnología puede implementarse mediante baños o sondas ultrasónicas. Si bien los baños presentan una distribución menos homogénea de la energía, las sondas permiten una transmisión más directa e intensa, lo que mejora el control y la eficiencia del proceso extractivo. (Tena y Asuero, 2022).

Figura 5

Representación esquemática de un equipo de extracción asistida por ultrasonido (EAU)



Fuente. Tena y Asuero, 2022

En condiciones adecuadas, la Extracción Asistida por Ultrasonido (EAU) se considera una técnica eficiente, versátil y ambientalmente favorable para la extracción de compuestos fenólicos, ya que permite operar a bajas temperaturas, reducir el uso de disolventes orgánicos y obtener altos rendimientos en tiempos cortos. Si bien existen limitaciones asociadas a la homogeneidad del campo acústico y al escalado industrial, esta tecnología destaca por su bajo costo, facilidad de uso y flexibilidad, pudiendo combinarse con otras estrategias, como el

calentamiento para mejorar el rendimiento o con tratamiento enzimático para mejorar el rendimiento y la bioactividad del extracto. (Tena y Asuero, 2022)

Metodología

Selección y Preparación de la Materia Prima

El pseudotallo de plátano fue recolectado en un cultivo del municipio de Piedecuesta (Santander), donde se retiraron las capas externas y el material remanente se cortó en fragmentos de aproximadamente 3×5 cm. La cáscara de cacao se obtuvo de cultivos del municipio de Floridablanca (Santander) y, tras su limpieza, fue reducida a un tamaño aproximado de 4×4 cm. Esta adecuación permitió homogenizar las muestras y facilitar las etapas posteriores de secado y extracción. Ambas materias primas fueron sometidas a secado en un horno de convección CE130 (GUNT Hamburg) a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas, hasta alcanzar un contenido de humedad inferior al 10 %.

Caracterización de Materias Primas

Se realizaron análisis proximales del pseudotallo de plátano y cáscara de cacao para determinar su composición. Cada ensayo se llevó a cabo por quintuplicado con el fin de asegurar la precisión, confiabilidad y reproducibilidad de los resultados.

Determinación de Humedad

El contenido de humedad se determinó mediante el método gravimétrico. Para ello, se pesaron 5 g de muestra en crisoles previamente tarados y se sometieron a secado en una mufla Terrígeno M10 a $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas. Posteriormente, las muestras se enfriaron en un desecador durante 1 hora y se registró el peso final. El porcentaje de humedad se calculó a partir de la diferencia entre el peso inicial y el peso seco obtenido, utilizando la Ecuación 1 (Cunniff & Washington, 1997).

$$\%Humedad = \frac{\text{Peso muestra humeda} - \text{Peso muestra seca}}{\text{Peso muestra humeda}} * 100 \quad [1]$$

Determinación de Cenizas

El contenido de cenizas se determinó mediante el método gravimétrico. Para ello, se pesaron 5 g de muestra en crisoles previamente tarados y se incineraron en una mufla Terrígeno M10 a 550 °C durante 4 horas, utilizando una rampa de calentamiento de 10 °C/min. Finalizada la incineración, los crisoles se enfriaron gradualmente, se colocaron en un desecador durante 2 horas y posteriormente se registró el peso final. El porcentaje de cenizas se calculó mediante la Ecuación 2, relacionando la masa del residuo inorgánico obtenido con la masa inicial de la muestra.

$$\%Cenizas = \frac{(Peso\ crisol + cenizas) - Pesocrisol}{Peso\ de\ la\ muestra} * 100 \quad [2]$$

Determinación de Proteína Cruda

El contenido de proteína cruda se determinó mediante el método Kjeldahl (AOAC 984.13). Para ello, se pesó 1 g de muestra y se sometió a digestión utilizando un sistema Velp Scientifica DKL 8, adicionando ácido sulfúrico concentrado, peróxido de hidrógeno, pastillas catalizadoras y antiespumantes. La digestión se realizó a 420 °C durante 60 minutos, obteniéndose una solución clara.

Posteriormente, la muestra fue neutralizada con hidróxido de sodio al 30 % y destilada en un sistema automático UDK 149, capturando el amoníaco liberado en una solución de ácido bórico al 4 %. El nitrógeno recuperado se cuantificó mediante titulación con ácido clorhídrico 0,1 N. El porcentaje de nitrógeno se calculó mediante la Ecuación 3 y el contenido de proteína cruda se obtuvo multiplicando el valor de nitrógeno total por el factor de conversión 6,25 (Cunniff & Washington, 1997).

$$\%N = \frac{(V_{HCl} - V_{Blanco}) * N_{HCl} * 1,4007}{P} [3]$$

Donde V_{HCl} corresponde al volumen de ácido clorhídrico consumido durante la titulación; V_{blanco} es el volumen de ácido clorhídrico gastado en la determinación del blanco; N_{HCl} representa la normalidad del ácido clorhídrico utilizado en la titulación; 1,4007 es el factor de conversión que permite expresar los milimoles de nitrógeno valorados como porcentajes de nitrógeno; y P corresponde al peso de la muestra analizada.

Determinación de Grasa Cruda

El contenido de grasa cruda se determinó mediante el método Soxhlet (AOAC 960.39). Se pesaron 5 g de muestra seca en cartuchos de celulosa y se sometieron a extracción continua con hexano utilizando un equipo automático Fat Analyzer TT-SOX 460 durante 3 horas a 80 °C. Finalizada la extracción, el solvente residual se eliminó mediante secado a 100–105 °C durante 30 minutos. Posteriormente, las muestras se enfriaron en un desecador y se registró el peso final.

El porcentaje de grasa cruda se calculó mediante el método gravimétrico, a partir de la diferencia entre el peso inicial y el peso final de la muestra después de la extracción, utilizando la Ecuación 4.

$$Grasa = \frac{(Peso\ inicial\ de\ la\ muestra\ seca + Peso\ de\ la\ muestra\ residual)}{Peso\ inicial\ de\ la\ muestra\ seca} * 100 [4]$$

Acondicionamiento de la Materias Primas

Previamente al proceso de extracción, las muestras fueron sometidas a una etapa de desengrasado con el fin de eliminar compuestos lipídicos que pudieran interferir en la recuperación y caracterización de compuestos fenólicos. Para ello, se empleó la misma metodología descrita para la determinación de grasa cruda mediante extracción Soxhlet utilizando hexano como solvente. A diferencia de la determinación de grasa, cuyo objetivo es

cuantificar el contenido lipídico de la muestra, el desengrasado se realizó como una etapa de acondicionamiento orientada a mejorar la eficiencia y selectividad del proceso de extracción de compuestos bioactivos (Fadilah et al., 2023).

Extracción de Compuestos Fenólicos

La extracción de compuestos bioactivos se realizó utilizando etanol al 90 % como solvente de extracción, debido a su eficacia para la recuperación de compuestos fenólicos y su condición de solvente seguro para aplicaciones alimentarias (Chemat et al., 2017). El pH se ajustó mediante una solución de ácido cítrico 0,1 N hasta alcanzar los valores establecidos en el diseño experimental (pH 2,0; 3,0 y 5,0).

Para cada ensayo, se mezclaron 5 g de muestra con 50 mL de etanol al 90 %, manteniendo una relación sólido-solvente de 1:10 (g/mL). Las mezclas fueron sometidas a extracción asistida por ultrasonido en un baño ultrasónico BioBase Digital Ultrasonic Cleaner Pro durante 30, 60 y 120 minutos. Finalizado cada tratamiento, los extractos se filtraron y almacenaron en recipientes ámbar a 4 °C hasta su posterior análisis.

Adicionalmente, se determinó el porcentaje de recuperación de masa de las muestras antes y después de la extracción, utilizando la Ecuación 5.

$$\text{Recuperación de masa}\% = \frac{\text{Masa final}}{\text{Masa inicial}} * 100 \text{ [5]}$$

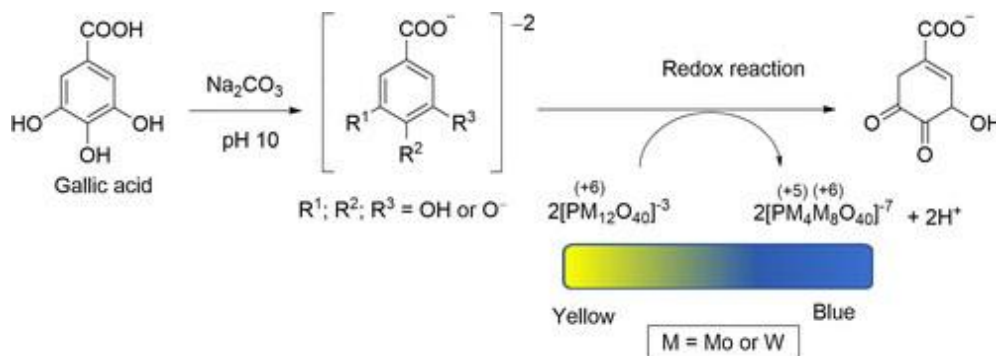
Determinación del Contenido de Compuestos Fenólicos

El contenido de compuestos fenólicos totales se determinó mediante el método de Folin-Ciocalteu. Para ello, se mezcló una alícuota del extracto con el reactivo Folin-Ciocalteu y una solución de carbonato de sodio. La mezcla se incubó en oscuridad durante 30 minutos y posteriormente se midió la absorbancia a 765 nm mediante espectrofotometría. La concentración de compuestos fenólicos se determinó a partir de una curva de calibración de ácido gálico y los

resultados se expresaron como miligramos de ácido gálico equivalente por gramo de muestra (mg GAE/g).

Figura 6

La reacción redox y la variación de color en el ensayo de Folin-Ciocalteu



Fuente. Munteanu y Apetrei. (2021).

Determinación de Actividad Antioxidante

La capacidad antioxidante se evaluó mediante ensayos espectrofotométricos que utilizan radicales libres de DPPH y ABTS; estos ensayos se basan en reacciones de transferencia de electrones o de transferencia de átomos de hidrógeno, que resultan en un cambio de color cuantificable por espectrofotometría, proporcionando una medida de la capacidad antioxidante total de la muestra. En el ensayo DPPH, el extracto se mezcló con la solución del radical libre, se incubó en la oscuridad y se midió la absorbancia a 517 nm, como se representa en la Figura 7(A). La actividad antioxidante de los extractos se expresó como porcentaje de inhibición del radical libre DPPH (%), calculado a partir de la disminución de la absorbancia del radical en presencia del extracto antioxidante. El porcentaje de inhibición se determinó mediante la siguiente ecuación 6.

$$\% \text{Inhibición} = \frac{A_{\text{control}} - A_{\text{muestra}}}{A_{\text{control}}} * 100 \quad [6]$$

Donde A_{control} corresponde a la absorbancia de la solución de DPPH en ausencia del extracto(control), mientras que A_{muestra} representa la absorbancia de la solución de DPPH en presencia del extracto.

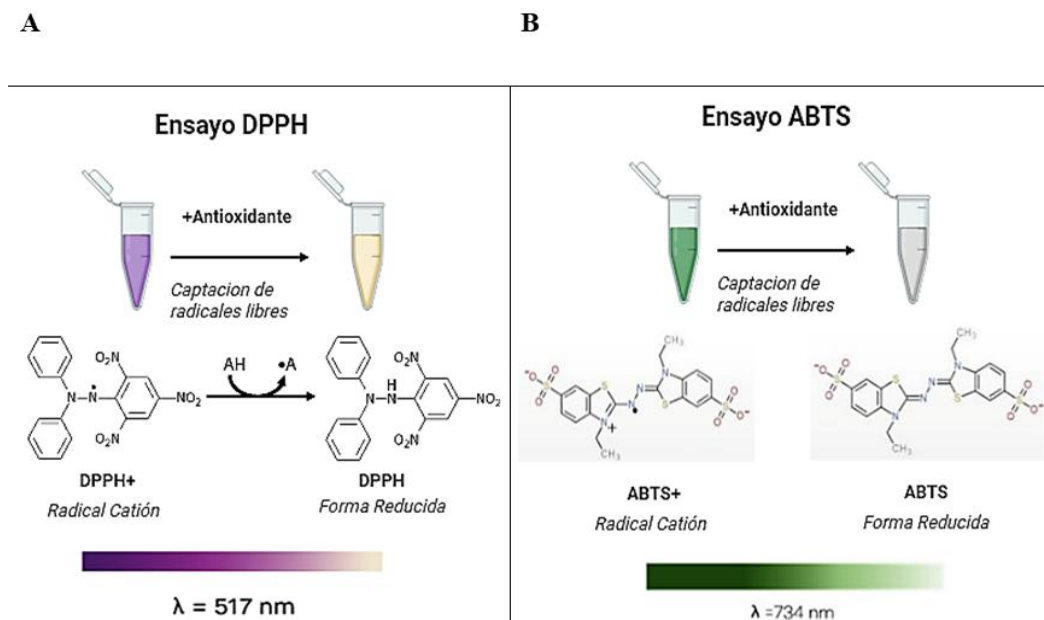
Una mayor disminución en la absorbancia indica una mayor capacidad del extracto para neutralizar radicales libres, reflejando una mayor actividad antioxidante.

Para el ensayo de ABTS, el radical catiónico fue generado previa y posteriormente se adicionó el extracto, se midió la absorbancia a 734 nm, como se representa en la Figura 7(B).

Temas de correlaciones entre ensayos a menudo son objetos de estudios. Se ha encontrado una correlación positiva entre Folin-Ciocalteu y ABTS, mientras que DPPH muestra correlaciones más débiles que con los otros tres, lo que sugiere que evalúa un mecanismo antioxidante diferente (Abramovič et al., 2017), con esto podemos concluir que ningún ensayo por sí solo puede proporcionar una imagen completa de la capacidad antioxidante.

Figura 7

Ensayos espectrofotométricos de la capacidad antioxidante



Nota. (A). Ilustración gráfica del Representación del ensayo DPPH y su mecanismo de captura de radicales libres. (B). Representación del ensayo ABTS y su mecanismo de captura de radicales libres. *Fuente.* Lim, J., et al. 2024.

Resultados y Discusión

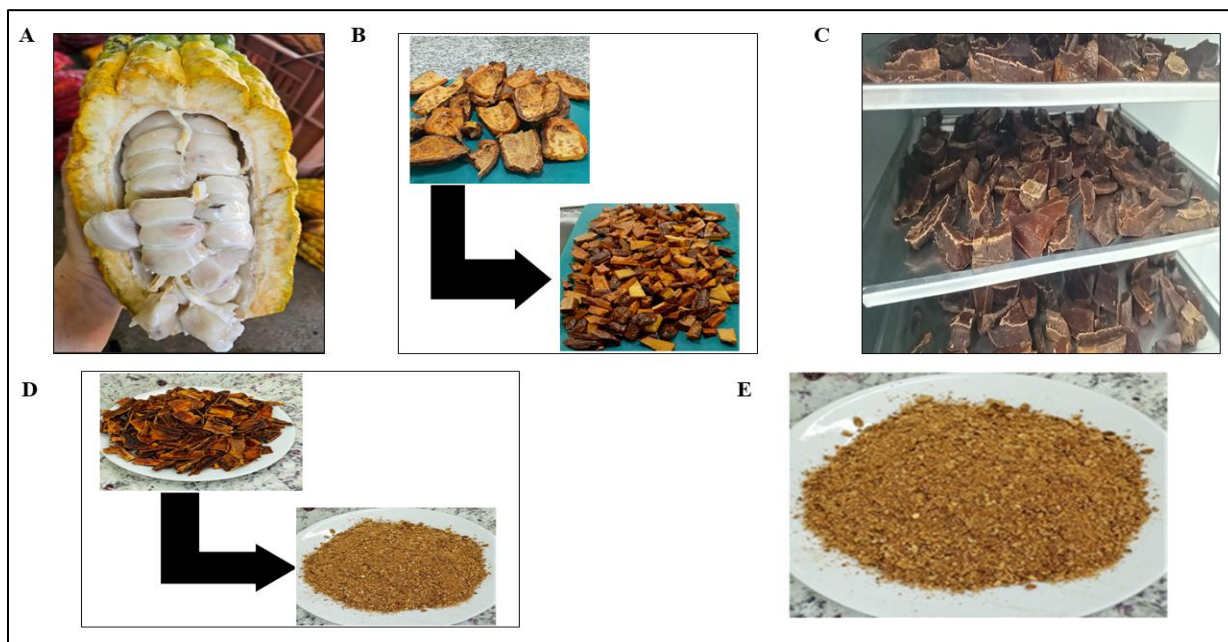
Selección y Preparación de la Materia Prima

La toma de muestra de la cáscara de cacao se efectuó en la finca García, ubicada en la vereda Casiano, ubicada a 10.6 kilómetros de la cabecera municipal de Floridablanca, Santander, Esta finca está situada en las coordenadas geográficas 7°03'34.4"N -73°03'33.7"W con una altitud aproximada de 1.321 metros sobre el nivel del mar. Se realizó el recorrido para el reconocimiento del cultivo de cacao, específicamente del genotipo Colección Castro Naranjal 51 (Figura 8A). Se recolectaron mazorcas maduras, las cuales fueron pesadas, luego se abrieron y se extrajeron los granos de cacao y se obtuvo solo la cáscara vacía, la cual constituye la materia vegetal de interés para el análisis y aprovechamiento dentro del proyecto.

La selección de las muestras se realizó de manera aleatoria para garantizar la representatividad y evitar sesgos en la toma del material vegetal. En total, se recolectaron 3000 gramos de muestras de cáscara de cacao del genotipo Colección Castro Naranjal 5, con el fin de analizar sus características para su aprovechamiento en los procesos del proyecto de investigación.

Figura 8

Etapas del procesamiento de la preparación de la cáscara de cacao



Nota. (A). Cacao Colección Castro Naranjal 51. (B). Proceso de troceado de la cáscara de cacao previo al secado. (C). Proceso de secado de la cáscara de cacao en un horno de convección. (D). Proceso de reducción de tamaño de la cáscara de cacao. (E). Producto obtenido de la reducción de la cáscara de cacao. *Fuente.* Autoría propia.

La cáscara de cacao se limpió, se retiró material restante del mucilago, posteriormente, se procedió a trocear (4 x 4 cm) , buscando obtener una homogeneidad adecuada de las muestras. este proceso se observa en la Figura 8(B).

En la Figura 8(C) se observa el proceso de secado de los trozos obtenidos, los cuales fueron distribuidos en 4 bandejas del horno de secado por convección modelo CE130 de la marca GUNT Hamburg, operando en un rango de temperaturas entre 45 °C y 56 °C. Se realizó registro periódico del peso de las muestras de cáscara de cacao en donde se verificó, la temperatura de entrada, la temperatura de salida, la velocidad del aire y la humedad relativa

durante el proceso de secado. En la Tabla del apéndice A, podemos analizar que hubo una reducción progresiva del peso de la cáscara de cacao, lo que nos indica que hubo una pérdida continua por secado a temperatura ambiente. Durante un periodo de 26 horas, se observó una reducción de peso del 76,2%. Asimismo, podemos definir que se evidencia una tendencia de disminución progresiva del peso del material a lo largo del tiempo, lo que indica que es una pérdida continua de humedad, lo que representa una pérdida de masa constante. Este comportamiento es coherente con el fundamento del secado convectivo, en donde se favorece la evaporación del contenido de agua. Hay que destacar, que la pérdida de masa fue considerablemente lenta, lo que indica la importancia de controlar las variables de proceso.

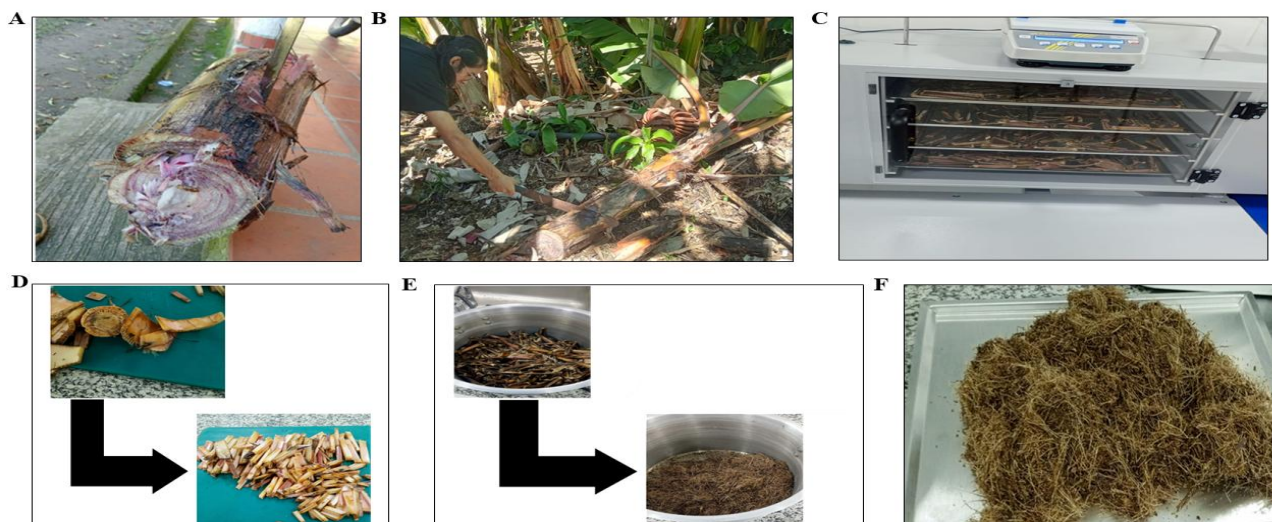
Según Nguyen et al. (2021), la cáscara de cacao presenta un contenido de humedad superior al 70%, lo que desestabiliza el almacenamiento y limita su aprovechamiento agroindustrial. Por esta razón, es fundamental implementar un proceso de deshidratación controlado que preserve sus propiedades fisicoquímicas, funcionales. Nguyen et al.(2021) evidenció que la operación térmica en el rango de 50-60 °C favorece una reducción significativa de la humedad sin afectar la integridad de los compuestos bioactivos presentes en la matriz de la cáscara de cacao.

Durante el secado de la cáscara de cacao se observó una disminución progresiva del peso debido a la pérdida de humedad, obteniéndose una relación decreciente entre el tiempo de secado y la masa del material, con un ajuste lineal de $R^2 = 0,7748$. Asimismo, la evaluación conjunta de la temperatura de entrada del aire y la pérdida de peso evidenció una relación inversa entre ambas variables, manteniéndose la reducción de masa incluso ante una fluctuación puntual de temperatura registrada durante el proceso. Las gráficas correspondientes a estos comportamientos se presentan en los apéndices B y C. Al finalizar el secado se obtuvo un peso

de 574,8 g de cáscara seca y, tras la reducción de tamaño, se recuperaron 410 g de material, registrándose una pérdida del 28,7 %, atribuida principalmente a la generación de material particulado durante la molienda, como se observa en la Figura 8(D-E). Las muestras de pseudotallo de plátano, fueron recolectadas en la finca Mi Cabaña, ubicada en la vereda San Benito de La esperanza, ubicada a 21,5 kilómetros de la cabecera municipal de Piedecuesta, Santander, de los cuales 19 kilómetros corresponden a vías secundarias y 2,5 kilómetros a vías terciarias con una sensación térmica de 24 °C y una humedad relativa del 58 %. Esta finca está situada en las coordenadas geográficas 6°53'59"N, 73°04'14"W, con una altitud aproximada de 1.633,98 metros sobre el nivel del mar. Se realizó la recolección de 2000 gramos de muestras de pseudotallo de plátano del género *musa acuminata* “Red Dacca” (Grupo AAA), variedad conocida comúnmente como Plátanos rojos. En la Figura 9(A), se presenta la muestra de pseudotallo *musa acuminata* utilizada como material de estudio. La recolección del pseudotallo fueron seleccionada de manera aleatoria para garantizar la representatividad y evitar sesgos en la selección del material vegetal , como se puede observar en la Figura 9(B).

Figura 9

Etapas del procesamiento de la preparación del pseudotallo de plátano



Nota. (A). Muestra de pseudotallo de plátano del género *Musa acuminata*. (B). Recolección de pseudotallo de plátano del género *Musa acuminata*. (C). Proceso de secado del pseudotallo de plátano en horno de secado por convención. (D). Proceso de troceado del pseudotallo de plátano previo al secado. (E). Proceso de reducción de tamaño del pseudotallo de plátano. (F). Material de pseudotallo de plátano obtenido luego de la disminución de tamaño. *Fuente.* Autoría Propia.

En la Figura 9(D), se muestra el proceso de troceado del pseudotallo de plátano, en donde se procedió a trocear (3 x 5 cm), buscando homogeneidad en los trozos del pseudotallo de plátano, los cuales fueron distribuidos en 4 bandejas del Horno de secado por convención modelo CE130 de la marca GUNT Hamburg, operando en rango de temperaturas entre 25°C a 56°C, como se puede observar en la Figura 9(C). Durante el proceso de secado, en donde se realizó registro periódico del peso de las muestras del pseudotallo de plátano. En cada medición se verificó, la temperatura de entrada, la temperatura de salida, la velocidad del aire y la humedad relativa durante el proceso de secado. Se realizó registro periódico del peso de la

muestra del pseudotallo de plátano en donde se verificó, la temperatura de entrada, la temperatura de salida, la velocidad del aire y la humedad relativa durante el proceso de secado.

Durante el proceso de secado del pseudotallo de plátano se registró una reducción progresiva del peso, pasando de 715,5 g a 203,2 g de biomasa, lo que representa una pérdida de masa del 71,6 % asociada principalmente a la eliminación de humedad. Las condiciones de secado mostraron una temperatura cercana a 50 °C, una disminución de la humedad relativa y una velocidad de aire estable, favoreciendo un proceso homogéneo y eficiente. Los registros detallados de estas variables se presentan en el apéndice D.

La pérdida de peso mostró una tendencia decreciente en función del tiempo, con un ajuste lineal de $R^2 = 0,8271$, evidenciando la efectividad del proceso de secado bajo las condiciones experimentales empleadas. Asimismo, la relación entre la temperatura del aire y la reducción de peso confirmó una disminución progresiva de la humedad del material. Las curvas de secado y el comportamiento conjunto de las variables pueden consultarse en el Apéndice E y Apéndice apenF. Al finalizar el proceso se obtuvieron 201 g de pseudotallo seco y, tras la reducción de tamaño de partícula, 183g de material, registrándose una pérdida adicional del 8,95 % atribuida principalmente a la generación de material particulado durante la molienda.

Caracterización de Materias Primas

Los resultados del análisis proximal de la cáscara de cacao y el pseudotallo de plátano se presentan en la Tabla 1, respectivamente. Ambas matrices mostraron bajos contenidos de humedad (9,853 % y 8,855 %), lo que evidencia la efectividad de los procesos de secado aplicados y garantiza una adecuada estabilidad durante el almacenamiento. Asimismo, los contenidos de cenizas fueron relativamente elevados (6,746 % para la cáscara de cacao y 5,756

% para el pseudotallo de plátano), indicando la presencia de minerales asociados a la estructura vegetal de ambas materias primas.

La cáscara de cacao presentó mayores contenidos de proteína cruda (3,421 %) y grasa cruda (2,163 %) en comparación con el pseudotallo de plátano (1,024 % y 0,959 %, respectivamente). Estas diferencias pueden atribuirse a la naturaleza fisiológica de cada matriz vegetal. La cáscara de cacao forma parte del fruto y conserva compuestos de reserva asociados al desarrollo de la semilla, mientras que el pseudotallo corresponde principalmente a un tejido estructural compuesto por celulosa, hemicelulosa y lignina, caracterizado por un bajo contenido de macronutrientes y una alta proporción de fibra (Kumar et al., 2014). No obstante, ambas materias primas presentan bajos contenidos lipídicos, característica favorable para procesos de extracción de compuestos fenólicos, ya que reduce la interferencia de sustancias apolares durante la recuperación de metabolitos bioactivos.

Los resultados obtenidos coinciden con reportes previos que describen a la cáscara de cacao y al pseudotallo de plátano como residuos agroindustriales con bajo aporte proteico y grasa, pero con un importante potencial como fuentes de compuestos fenólicos, flavonoides y otros metabolitos de interés biotecnológico (Kumar et al., 2014; Salas & Moscote, 2023). En conjunto, estas características respaldan su aprovechamiento en procesos de valorización orientados a la obtención de extractos bioactivos y al desarrollo de ingredientes funcionales para aplicaciones agroalimentarias.

Tabla 1

Resultados de los análisis proximales de las muestras seca de cáscara de cacao y pseudotallo plátano.

Matriz	Humedad	Cenizas	proteína	Grasa
Vegetal	(%)	(%)	Cruda (%)	Cruda (%)
Cáscara de cacao	9,853±0,65	6,746±0,93	3,421±8,06	2,163±2,06
Pseudotallo de plátano	8,855±1,09	5,756±0,96	1,024±5,14	0,959±2,67

Nota. Valores corresponden al promedio de las determinaciones realizadas y su respectiva desviación estándar. *Fuente.* Autoría Propia.

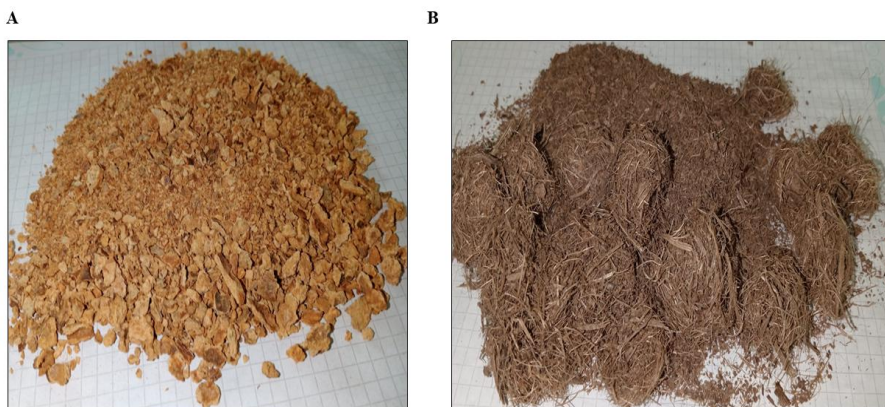
Acondicionamiento de Materias Primas

Posterior del proceso de desengrasado, se determinó que la cáscara de cacao presentó un contenido de grasa cruda de 2,163±2,06, mientras que el pseudotallo de plátano, 0,959±2,67 valores coherentes con residuos agrícolas. Estos resultados evidencian un bajo contenido lipídico en ambas matrices, característica común de residuos agrícolas de origen vegetales, confirmando la eficacia del procedimiento de extracción y sugiere que no se generara interferencias significativas durante la posterior recuperación de compuestos polares.

Adicionalmente, se observaron cambios visibles en la apariencia de las muestras tras el proceso de desengrasado. El pseudotallo de plátano presentó un color más claro y una textura visiblemente más seca (Figura 10(A)), mientras que la cáscara de cacao mostró una disminución en la intensidad de su color(Figura 10(B)), lo que coincide con la remoción parcial de fracciones lipofílicas durante el tratamiento.

Figura 10

Matrices vegetales después del proceso de desengrasado



Nota.(A). Pseudotallo de plátano después del proceso de extracción de grasa.(B). Cáscara de cacao después del proceso de desengrasado. *Fuente.* Autoría Propia.

Extracción de Compuestos Fenólicos

En la Tabla 2, se presentan los resultados de recuperación de masa obtenidos a partir de la cáscara de cacao y el pseudotallo de plátano, mediante extracción asistida por ultrasonido bajo diferentes condiciones de pH y tiempo de extracción.

Los mayores porcentajes de recuperación de masa en la cáscara de cacao se registraron a los 120 minutos de extracción, alcanzando un valor máximo de 67,875 % en el tratamiento con pH 5,00. Este comportamiento puede atribuirse al efecto de la cavitación acústica generada por las ondas ultrasónicas. Durante este proceso, la formación, crecimiento y colapso de microburbujas produce fuerza de cizallamiento capaces de provocar la ruptura parcial de las paredes celulares, incrementar la porosidad de la matriz vegetal y favorecer la penetración del solvente hacia el interior de los tejidos.

Como consecuencia, aumenta la transferencia de masa y se facilita la liberación de compuestos solubles e intracelulares hacia el medio extractor. Diversos estudios han señalado

que el ultrasonido mejora significativamente la eficiencia extractiva debido a la reducción del tamaño de partícula, el incremento del área superficial de contacto y la alteración estructural de los tejidos vegetales, lo que favorece la difusión de metabolitos y otros compuestos de interés (Chemat et al., 2017). Los resultados obtenidos concuerdan con lo reportado para residuos de cáscara de cacao, donde la extracción asistida por ultrasonido permitió una mayor recuperación de compuestos bioactivos al aumentar el tiempo de sonicación, debido a una intensificación de los fenómenos de cavitación y transferencia de masa.

En contraste, los resultados obtenidos para el pseudotallo de plátano evidenciaron una recuperación de masa inferior respecto a la cáscara de cacao. A los 30 minutos, los valores oscilaron entre 48,564 % y 49,606 %, mientras que a los 60 minutos variaron entre 49,368 % y 50,705 %. Los mayores porcentajes se registraron a los 120 minutos, alcanzando un máximo de 55,910 % en el tratamiento a pH 5,00. Aunque el incremento del tiempo de extracción favoreció la recuperación de compuestos, la menor eficiencia observada puede atribuirse a las características estructurales del pseudotallo de plátano, el cual está constituido principalmente por una matriz lignocelulósica rica en celulosa, hemicelulosa y lignina. Estas macromoléculas forman una red compleja y altamente organizada que dificulta la penetración del solvente y limita la transferencia de masa desde el interior de los tejidos vegetales hacia el medio extractor. Según Mohapatra et al. (2010), el pseudotallo de plátano presenta un elevado contenido de fibras estructurales que le confieren resistencia mecánica y estabilidad celular.

Asimismo, Según Kumar et al. (2009), la lignina constituye uno de los principales factores de recalcitrancia de la biomasa lignocelulósica, ya que forma una barrera estructural que limita la accesibilidad a los componentes celulares. De manera similar, Beck et al. (2022) describen que las interacciones físico-químicas entre lignina, hemicelulosa y celulosa generan

una estructura altamente organizada que dificulta la penetración de solventes y la transferencia de masa durante los procesos de extracción. Asimismo, se ha reportado que el elevado contenido de lignina incrementa la resistencia de la biomasa a los procesos de desestructuración, reduciendo la eficiencia de recuperación de compuestos de interés (Jamaldheen et al., 2022).

Resultados similares han sido reportados en materiales lignocelulósicos, donde matrices con mayor contenido de lignina presentan menores rendimientos de extracción en comparación con residuos agroindustriales menos estructurados. No obstante, el incremento progresivo de la recuperación de masa observado hasta los 120 minutos indica que una exposición prolongada al ultrasonido favorece la desestructuración gradual de la matriz fibrosa, incrementando la difusión de compuestos solubles hacia el solvente y mejorando la eficiencia extractiva.

Tabla 2

Recuperación de masa(%) de la cáscara de cacao y pseudotallo de plátano obtenida bajo diferentes condiciones de pH y tiempo durante la extracción asistida por ultrasonido (EUA)

Nº Muestra	pH	Tiempo (min)	Recuperación de masa (%) Cáscara de cacao	Recuperación de masa (%) Pseudotallo de plátano
T1	2,00	30	58,646	48,564
T2	3,00	30	59,674	49,606
T3	5,00	30	60,153	48,824
T4	2,00	60	59,648	50,705
T5	3,00	60	60,313	49,697
T6	5,00	60	67,627	49,368

T7	2,00	120	67,092	55,268
T8	3,00	120	66,730	55,910
T9	5,00	120	67,875	54,540

Nota. Condiciones experimentales de extracción asistida por ultrasonido: etanol al 90 % como solvente, relación sólido-solvente 1:10 (g/mL) y ajuste de pH mediante solución de ácido cítrico 0,1 N. Los tratamientos se realizaron a pH 2,0; 3,0 y 5,0 con tiempos de extracción de 30, 60, 120 minutos. Fuente. Autoría propia

Determinación de Actividad Antioxidante

A partir del análisis de las curvas obtenidas en los ensayos de Folin-Ciocalteu (Apéndice I), ABTS (Apéndice J), DPPH (Apéndice K), se evidencia un comportamiento lineal adecuado, lo que indica una correcta preparación de las curvas de calibración y una relación proporcional entre la concentración de los compuestos fenólicos y la respuesta instrumental medida (absorbancia). En el método de Folin, la ecuación de la recta ($Y = 0,0005x + 0,0201$) presenta una pendiente positiva baja, lo cual es consistente con la sensibilidad del método para la cuantificación de fenoles totales, sugiriendo que pequeñas variaciones en la concentración generan incrementos medibles en la señal. Por su parte, en el ensayo ABTS ($Y = -0,0225x + 0,7998$), y ensayo DPPH ($Y = -0,0002x + 0,4105$), la pendiente negativa refleja la disminución de la absorbancia conforme aumenta la capacidad antioxidante de la muestra, debido a la reducción del radical ABTS•+ y del radical DPPH lo cual concuerda con el fundamento químico del método.

Estos resultados son coherentes con lo reportado en la literatura, donde se establece que el reactivo de Folin-Ciocalteu reacciona con compuestos fenólicos generando un complejo de color azul medible espectrofotométricamente, mientras que el método ABTS evalúa la capacidad

de los antioxidantes para neutralizar radicales libres, evidenciado en la decoloración del radical catiónico (Singleton et al., 1999; Re et al., 1999). En conjunto, la linealidad observada en las curvas sugiere una adecuada precisión analítica y respalda la confiabilidad de los resultados obtenidos, permitiendo inferir que las muestras analizadas poseen compuestos con actividad antioxidante significativa. Esto resulta relevante en el contexto del estudio, ya que confirma la validez de los métodos empleados para la cuantificación de metabolitos bioactivos.

Este comportamiento puede atribuirse al mecanismo de cavitación generado por el ultrasonido, el cual favorece la ruptura de las estructuras celulares y mejora la transferencia de masa entre la matriz vegetal y el solvente. A medida que aumenta el tiempo de sonicación, se incrementa el contacto entre el solvente y los compuestos solubles presentes en el material, favoreciendo su extracción. Las diferencias observadas entre la cáscara de cacao y el pseudotallo de plátano probablemente están relacionadas con la composición y estructura de cada matriz, ya que el pseudotallo presenta una mayor proporción de componentes lignocelulósicos que pueden limitar la liberación de compuestos extraíbles en comparación con la cáscara de cacao. En conjunto, los resultados sugieren que, bajo las condiciones evaluadas, el incremento del tiempo de extracción tuvo una mayor incidencia sobre la recuperación de masa que las variaciones de pH estudiadas.

Los resultados obtenidos mediante los ensayos de Folin-Ciocalteu, DPPH y ABTS se muestran en la Tabla 3 y 4, se evidencian diferencias significativas entre la cáscara de cacao y el pseudotallo de plátano. La cáscara de cacao presentó mayores valores de compuestos fenólicos y actividad antioxidante, destacándose el tratamiento T5 (pH 3,0 y 60 min), con 1,65 mg GAE/g de fenoles totales, 90,48 % de inhibición DPPH y 0,1198 mol TE/g en ABTS. Estos resultados sugieren que las condiciones moderadamente ácidas favorecieron la extracción de compuestos

bioactivos mediante ultrasonido, lo que coincide con estudios que reportan una alta concentración de polifenoles en subproductos del cacao (Okiyama et al., 2017).

En contraste, el pseudotallo de plátano presentó menores valores de fenoles totales y capacidad antioxidante, alcanzando su mejor respuesta en el tratamiento T2 (pH 3,0 y 30 min), con 0,50 mg GAE/g de fenoles totales, 42,68 % de inhibición DPPH y 0,1087 mol TE/g en ABTS. Esta diferencia puede atribuirse a la naturaleza lignocelulósica de esta matriz, la cual dificulta la liberación de compuestos fenólicos durante la extracción (Kumar et al., 2014). Asimismo, los tratamientos realizados a pH 5,0 presentaron valores negativos en DPPH y ABTS, lo que sugiere una baja recuperación de compuestos antioxidantes o posibles interferencias analíticas asociadas a la composición de la matriz y a la estabilidad de los compuestos extraídos bajo estas condiciones.

Diversos autores han señalado que el pH influye directamente sobre la estabilidad de los compuestos fenólicos y sobre la respuesta de los métodos espectrofotométricos utilizados para su cuantificación, pudiendo afectar la capacidad de los extractos para neutralizar radicales libres y generar respuestas analíticas atípicas cuando las condiciones de extracción no son las más adecuadas (Prior et al., 2005; Apak et al., 2016).

Tabla 3

Matriz experimental del diseño factorial 3X3 para la optimización del proceso de extracción asistida por ultrasonido de la matriz de cáscara de cacao

N°	pH	Tiempo	Fenoles totales	DPPH	ABTS
Muestra		(min)	(mg GAE / g)	(% inhib.)	(mol TE/g)
T1	2,00	30	0,20	79,51	0,0420
T2	3,00	30	1,35	85,12	0,1131

T3	5,00	30	0,09	56,59	0,0264
T4	2,00	60	0,70	81,22	0,0242
T5	3,00	60	1,65	90,48	0,1198
T6	5,00	60	0,15	58,05	0,0153
T7	2,00	120	1,00	82,93	0,1009
T8	3,00	120	0,95	82,44	0,1009
T9	5,00	120	0,05	43,17	0,0198

Nota. La tabla presenta la matriz experimental correspondiente al diseño factorial completo 3×3 utilizado para la optimización del proceso de extracción de metabolitos activos a partir de cáscara de cacao. Se evaluaron dos factores: el pH del solvente etanol-ácido cítrico (pH 2, 3 y 5) y el tiempo de exposición al ultrasonido (30, 60 y 120 minutos). *Fuente.* Autoría propia.

Tabla 4

Matriz experimental del diseño factorial 3X3 para la optimización del proceso de extracción asistida por ultrasonido de la matriz de pseudotallo de plátano

N°	pH	Tiempo	Fenoles totales	DPPH (%)	ABTS
Muestra		(min)	(mg GAE / g)	inhib.)	(mol TE/g)
T1	2,00	30	0,09	23,66	0,0198
T2	3,00	30	0,50	42,68	0,1087
T3	5,00	30	-0,76	-8,30	-0,0669
T4	2,00	60	0,09	2,93	0,0264
T5	3,00	60	0,05	40,49	0,1042
T6	5,00	60	-0,56	-7,07	-0,0747
T7	2,00	120	0,05	3,90	0,0564

T8	3,00	120	0,09	40	0,0953
T9	5,00	120	-0,46	-1,46	-0,0636

Nota. La tabla presenta la matriz experimental correspondiente al diseño factorial completo 3×3 utilizado para la optimización del proceso de extracción de metabolitos activos a partir de pseudotallo de plátano. Se evaluaron dos factores: el pH del solvente etanol-ácido cítrico (pH 2, 3 y 5) y el tiempo de exposición al ultrasonido (30 , 60 y 120 minutos). *Fuente.* Autoría propia.

Los resultados obtenidos indican que la extracción asistida por ultrasonido utilizando una solución etanol-ácido cítrico ajustada a pH 3,0 favoreció la recuperación de compuestos fenólicos y la actividad antioxidante en ambas matrices vegetales. Estos hallazgos evidencian la importancia de las condiciones de extracción sobre la eficiencia del proceso y respaldan el potencial de la cáscara de cacao y el pseudotallo de plátano como fuentes de compuestos bioactivos de interés para aplicaciones agroalimentarias y biotecnológicas.

Conclusiones

Los resultados obtenidos permitieron analizar que existen diferencias significativas entre las dos matrices vegetales evaluadas, tanto en su composición proximal como en su comportamiento durante la extracción y su capacidad antioxidante. La cáscara de cacao presentó una composición nutricional más rica, con mayores contenidos de proteína, grasa y cenizas, lo que sugiere una mayor concentración de compuestos bioactivos. Esto se vio reflejado en su desempeño analítico, donde alcanzó el mayor contenido de compuestos fenólicos totales mediante el método de Folin-Ciocalteu (1,65 mg GAE/g), superando ampliamente al pseudotallo de plátano (0,50 mg GAE/g), lo que evidencia su mayor potencial como fuente de compuestos antioxidantes.

En cuanto al proceso de extracción asistida por ultrasonido, se comprobó que tanto el pH como el tiempo de extracción influyen significativamente en la recuperación de masa y en la liberación de compuestos bioactivos. La cáscara de cacao alcanzó una recuperación máxima de 67,875% a pH 5,0 y 120 minutos, mientras que el pseudotallo de plátano presentó valores inferiores, con un máximo cercano a 55,910% bajo las mismas condiciones. Estas diferencias se atribuyen a la mayor proporción de compuestos solubles en la cáscara de cacao, en contraste con la estructura lignocelulósica del pseudotallo, que limita la penetración del solvente y la eficiencia de extracción.

Respecto a la actividad antioxidante, los resultados obtenidos mediante los ensayos DPPH y ABTS mostraron una tendencia consistente con el contenido fenólico. La cáscara de cacao presentó la mayor capacidad antioxidante, alcanzando un porcentaje de inhibición DPPH de 90,49%, mientras que el pseudotallo de plátano registró un valor máximo de 42,68%. De igual manera, en el ensayo ABTS, la cáscara de cacao obtuvo un valor de 0,1198 mol TE/g, superior al

pseudotallo (0,1087 mol TE/g), confirmando que una mayor concentración de compuestos fenólicos se interpreta como una mayor capacidad de neutralización de radicales libres.

Asimismo, se evidenció que las condiciones óptimas de extracción para maximizar tanto el contenido fenólico como la actividad antioxidante corresponden a un pH ácido (pH 3,00) y tiempos moderados de extracción (30 a 60 minutos). Bajo estas condiciones se lograron simultáneamente los valores más altos en los tres ensayos evaluados (Folin, DPPH y ABTS), lo que indica que el control del pH es un factor crítico para preservar la estabilidad de los compuestos bioactivos. Por el contrario, a pH más elevados (pH 5,00), se observó una disminución en la actividad antioxidante, e incluso valores negativos en algunos casos, lo que sugiere degradación de compuestos fenólicos y posible comportamiento prooxidante.

En conjunto, los resultados demuestran que la cáscara de cacao presenta un mayor potencial como fuente de antioxidantes naturales y compuestos funcionales, mientras que el pseudotallo de plátano, aunque con menor eficiencia extractiva y actividad antioxidante, representa una alternativa viable desde el punto de vista de aprovechamiento sostenible de residuos agroindustriales. Esto resalta la importancia de optimizar las condiciones de extracción para cada matriz, con el fin de maximizar la recuperación de compuestos bioactivos y su posible aplicación en la industria alimentaria y nutracéutica así mismo promoviendo la economía circular y poder generar un valor agregado a los residuos agrícolas.

Recomendaciones

Con la realización del proyecto, se puede continuar con la optimización del proceso de extracción asistida por ultrasonido mediante la evaluación de variables adicionales como la potencia ultrasónica, la relación sólido-solvente y el tipo de solvente o mezclas hidroalcohólicas, con el fin de mejorar la eficiencia y selectividad en la recuperación de compuestos bioactivos. Asimismo, es importante desarrollar estudios orientados al escalamiento industrial del proceso para validar su viabilidad técnica y económica en condiciones reales de producción.

Profundizar en la caracterización química de los extractos mediante técnicas avanzadas como cromatografía líquida de alta eficiencia (HPLC) y espectrometría de masas, así como evaluar su estabilidad frente a factores como temperatura, luz y pH, lo que permitirá determinar su aplicabilidad en diferentes matrices. Adicionalmente, se recomienda investigar otras actividades biológicas de los extractos, tales como su potencial antimicrobiano y antiinflamatorio, con el propósito de ampliar sus posibles usos.

Finalmente, se propone explorar la incorporación de estos extractos en el desarrollo de alimentos funcionales, productos nutracéuticos y sistemas de envasado inteligente, así como fomentar su aprovechamiento dentro de modelos de economía circular, estableciendo alianzas con el sector productivo platanero y cacaoero para la implementación de tecnologías de valorización de residuos a escala industrial.

Referencias Bibliográficas

Abeyasinghe, D. C., & Kumari, I. P. N. P. (2012). Antioxidant activity and phenolic content of different pod tissues of five selected cocoa hybrid lines. *Journal of Food and Agriculture*, 5(1–2), 5. <https://doi.org/10.4038/jfa.v5i1-2.5177>

Abramovič, H., Grobin, B., Poklar Ulrih, N., & Cigić, B. (2017). The Methodology Applied in DPPH, ABTS and Folin-Ciocalteu Assays Has a Large Influence on the Determined Antioxidant Potential. *Acta Chimica Slovenica*, 64(2), 491–499. <https://doi.org/10.17344/acsi.2017.3408>

Aguiar Freire, C. E. C. de, Gonçalves, S. F., de Souza Moreira, C., Reis, R. M., Matias de Alencar, S., & Mello Cesar, A. S. (2024). Yogurt enriched with nanoencapsulated anthocyanins: Effects on the modulation of the gut microbiota and its influence on health. *Current Research in Food Science*, 9(100857), 100857. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2024.100857>

Apak, R., Özyürek, M., Güçlü, K., & Çapanoğlu, E. (2016). Antioxidant activity/capacity measurement. 1. Classification, physicochemical principles, mechanisms, and electron transfer (ET)-based assays. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 64(5), 997–1027. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b04739>

Ávila Bezerra, M. A., Santelli, R. E., Oliveira, E. P., Villar, L. S., & Escaleira, L. A. (2008). Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry. *Talanta*, 76(5), 965–977. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2008.05.019>

Ávila, Wilson, Medina Vargas, Oscar J., & Moreno Bastidas, Lucía M.. (2019). Aplicación de un diseño factorial 23 en la extracción asistida por microondas y evaluación de la actividad antioxidante de los compuestos presentes en frutos de *Vaccinium meridionale*. *Revista*

Colombiana de Ciencias Químico - Farmacéuticas, 48(3), 643-661. Epub November 03, 2020. <https://doi.org/10.15446/rcciquifa.v48n3.84983>

Banu Jamaldeen, S., Kurade, M. B., Basak, B., Yoo, C. G., Oh, K. K., Jeon, B. H., & Kim, T. H. (2022). A review on physico-chemical delignification as a pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced bioconversion. *Bioresource technology*, 346, 126591. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126591>

Bezerra, M. A., Santelli, R. E., Oliveira, E. P., Villar, L. S., & Escaleira, L. A. (2008). Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry. *Talanta*, 76(5), 965–977. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2008.05.019>

Calderaro, A., Barreca, D., Bellocco, E., Smeriglio, A., Trombetta, D., & Laganà, G. (2020). Colored phytonutrients: Role and applications in the functional foods of anthocyanins. In *Phytonutrients in Food* (pp. 177–195). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-815354-3.00011-3>

Chemat, F., Rombaut, N., Sicaire, A.-G., Meullemiestre, A., Fabiano-Tixier, A.-S., & Abert-Vian, M. (2017). Ultrasound assisted extraction of food and natural products. Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications. A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 34, 540–560. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.06.035>

Cunniff, P., & Washington, D. (1997). Official methods of analysis of AOAC International. *J. AOAC Int*, 80(6), 127A.

Dai, J., & Mumper, R. J. (2010). Plant phenolics: Extraction, analysis and their antioxidant and anticancer properties. *Molecules*, 15(10), 7313–7352. <https://doi.org/10.3390/molecules15107313>

DANE. (2025). Encuesta nacional agropecuaria (ENA). DANE.

<https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/agropecuario/encuesta-nacional-agropecuaria-ena>

De la Rosa Reyna, X. F., León, I. G., Mendoza, J. H., Baquera, J. M., & Di Carlo Quiroz Velásquez, J. (2022). ANTOCIANINAS, PROPIEDADES FUNCIONALES y POTENCIALES APLICACIONES TERAPÉUTICAS. <https://www.redalyc.org/journal/4263/426374726001/html/>

Díaz, F. J. C. (2022). La conexión sostenible: residuos y economía circular en agricultura intensiva. Plataforma Tierra. <https://www.plataformatierra.es/innovacion/la-conexion-sostenible-residuos-y-economia-circular-en-agricultura-intensiva>

Elleuch, M., Bedigian, D., Roiseux, O., Besbes, S., Blecker, C., & Attia, H. (2011).

Dietary fibre and fibre-rich by-products of food processing: Characterisation, technological functionality and commercial applications: A review. *Food Chemistry*, 124(2), 411–421.

<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.06.077>

Fadilah, N. I. M., Phang, S. J., Kamaruzaman, N., Salleh, A., Zawani, M., Sanyal, A., Maarof, M., & Fauzi, M. B. (2023). Antioxidant Biomaterials in Cutaneous Wound Healing and Tissue Regeneration: A Critical Review. *Antioxidants*, 12(4), 787.

<https://doi.org/10.3390/antiox12040787>

Geadá, P., Moreira, C., Silva, M., Nunes, R., Madureira, L., Rocha, C. M. R., Pereira, R. N., Vicente, A. A., & Teixeira, J. A. (2021). Algal proteins: Production strategies and nutritional and functional properties. *Bioresource Technology*, 332(125125), 125125.

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125125>

Ghafoor, K., Park, J., & Choi, Y.-H. (2010). Optimization of supercritical fluid extraction of bioactive compounds from grape (*Vitis labrusca* B.) peel by using response surface

methodology. *Innovative Food Science & Emerging Technologies: IFSET: The Official Scientific Journal of the European Federation of Food Science and Technology*, 11(3), 485–490.

<https://doi.org/10.1016/j.ifset.2010.01.013>

Gould, K. S. (2004). Nature's Swiss Army Knife: The Diverse Protective Roles of Anthocyanins in Leaves. *BioMed Research International*, 2004(5), 314-320.

<https://doi.org/10.1155/s1110724304406147>

Güengue, C.. (2022). Extracción y cuantificación de saponinas a partir del ajo macho (*Allium sativum*) utilizando técnicas de extracción verdes. Universidad del Cauca.

<http://repositorio.unicauca.edu.co:8080/xmlui/handle/123456789/6213>

Islam, M. S., Kasim, S., Amin, A. M., Hun, T. G., Alam, M. K., & Haque, M. A. (2022). Banana-pseudostem sap growing media as a novel source of phytochemicals and mineral nutrients: Influence on seedling growth of sweet corn. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 82(1), 135–145. <https://doi.org/10.4067/s0718-58392022000100135>

Kammoun, M.M., Ayeb, H., Bettaieb, T., & Richel, A. (2020). Chemical characterisation and technical assessment of agri-food residues, marine matrices, and wild grasses in the South Mediterranean area: A considerable inflow for biorefineries. *Waste management*, 118, 247-257 .

Kumar, P. R., Srivastava, S., Singh, K. K., Mathad, C., & Thin, P. S. (2014). Study of antioxidant and antimicrobial properties, phytochemical screening and analysis of sap extracted from banana (*Musa acuminata*) pseudostem. *International Journal of Advanced Biotechnology and Research*, 5(4), 649-658.

Li, W., Peng, C., Zhaojie, L., & Wei, W. (2022). Chemopreventive and therapeutic properties of anthocyanins in breast cancer: A comprehensive review. *Nutrition Research (New York, N.Y.)*, 107, 48–64. <https://doi.org/10.1016/j.nutres.2022.08.005>

Lim, S., Song, H. Y., Park, H. R., & Ahn, K. B. (2024). A Novel Deinococcus Antioxidant Peptide Mitigates Oxidative Stress in Irradiated CHO-K1 Cells. *Microorganisms*, 12(11), 2161. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12112161>

Limón, D., Díaz, A., Mendieta, L., Luna, F., Zenteno, E., Guevara, J., Fernández, Álvarez, Jaimes, Bustos, Patlán, Castañeda, Fonseca, Guevara, Álvarez, Romero, & Meza, Vázquez. (2010). Los flavonoides: Mecanismo de acción, neuroprotección y efectos farmacológicos. *Mensaje Bioquímico*, XXXIV, 143-154

Llerena, W., Samaniego, I., Vallejo, C., Arreaga, A., Zhunio, B., Coronel, Z., Quiroz, J., Angós, I., & Carrillo, W. (2023). Profile of Bioactive Components of Cocoa (*Theobroma cacao* L.) By-Products from Ecuador and Evaluation of Their Antioxidant Activity. *Foods*, 12(13), 2583. <https://doi.org/10.3390/foods12132583>

Martín Gordo, D. A. (2018). Los Compuestos Fenólicos, Un Acercamiento A Su Biosíntesis, Síntesis Y Actividad Biológica. *Revista De Investigación Agraria Y Ambiental*, 9(1), 81-104. <https://doi.org/10.22490/21456453.1968>

Mohapatra, D., Mishra, S. and Sutar, N. (2010) Banana and Its By-Product Utilisation: An Overview. *Journal of Scientific & Industrial Research*, 69, 323-329.

Montaño, Francisco & Blasco, Gabriela. (2014). Propiedades funcionales del plátano (*Musa sp*).. 14. 22-26

Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments*. John Wiley & sons.

Munteanu, I. G., & Apetrei, C. (2021). Analytical methods used in determining antioxidant activity: A review. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(7), 3380.

<https://doi.org/10.3390/ijms22073380>

Nguyen, V. T., Tran, T. G., & Tran, N. L. (2022). Phytochemical compound yield and antioxidant activity of cocoa pod husk (*Theobroma cacao* L.) as influenced by different dehydration conditions. *Drying Technology*, 40(10), 2021–2033.

<https://doi.org/10.1080/07373937.2021.1913745>

Nielsen, S. S. (Ed.). (2010). *Food analysis*.

OEC . (2025). Plátanos (HS: 0803) Comercio de Productos, Exportadores e Importadores | Observatorio de Complejidad Económica. Observatorio de Complejidad Económica.

<https://oec.world/es/profile/hs/bananas>

Okiyama, D. C. G., Navarro, S. L. B., & Rodrigues, C. E. C. (2017). Cocoa shell and its compounds: Applications in the food industry. *Trends in Food Science & Technology*, 63, 103–112. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.03.007>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2023). «Países Productores de Cacao a Nivel Mundial».

Osamede Airouyuwa, J., Sivapragasam, N., Ali Redha, A., & Maqsood, S. (2024). Sustainable green extraction of anthocyanins and carotenoids using deep eutectic solvents (DES): A review of recent developments. *Food Chemistry*, 448, 139061.

<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139061>

P. Kumar, D. M. Barrett, M. J. Delwiche and P. Stroeve, “Methods for Pretreatment of Lignocellulosic Biomass for Efficient Hydrolysis and Biofuel Production,” *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 48, No. 8, 2009, pp. 3713-3729. doi:10.1021/ie801542g

Prajit, R., Sritawan, N., Suwannakot, K., Naewla, S., Aranarochana, A., Sirichoat, A., Pannangrong, W., Wigmore, P., & Welbat, J. U. (2020). Chrysin protects against memory and

hippocampal neurogenesis depletion in D-galactose-induced aging in rats. *Nutrients*, 12(4), 1100.

<https://doi.org/10.3390/nu12041100>

Prior, R. L., Wu, X., & Schaich, K. (2005). Standardized methods for the determination of antioxidant capacity and phenolics in foods and dietary supplements. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(10), 4290–4302. <https://doi.org/10.1021/jf0502698>

Promusa. (2020). Morfología de la planta del banano | Improving the understanding of banana. Improving The Understanding of Banana.

<https://www.promusa.org/Morfolog%C3%ADa+de+la+planta+del+banano>

Rahal, A., Kumar, A., Singh, V., Yadav, B., Tiwari, R., Chakraborty, S., & Dhama, K. (2014). Oxidative stress, prooxidants, and antioxidants: the interplay. *BioMed research international*, 2014, 761264. <https://doi.org/10.1155/2014/761264>

Rani, P., Nagasowjanya, G., Ajitha, A., & India, T. (2015). AQUAMETRY - THE MOISTURE CONTENT DETERMINATION. .

Rebello, C. J., Burton, J., Heiman, M., & Greenway, F. L. (2015). Gastrointestinal microbiome modulator improves glucose tolerance in overweight and obese subjects: A randomized controlled pilot trial. *Journal of Diabetes and Its Complications*, 29(8), 1272–1276. <https://doi.org/10.1016/j.jdiacomp.2015.08.023>

Robayo C, E. (2015). VALIDACIÓN DEL MÉTODO PARA LA DETERMINACIÓN DE PECTINA EN CÁSCARA DE CACAO. 10.13140/RG.2.2.34008.01280

Rojo-Poveda, O., Barbosa-Pereira, L., Zeppa, G., & Stévigny, C. (2020). Cocoa Bean Shell-A By-Product with Nutritional Properties and Biofunctional Potential. *Nutrients*, 12(4), 1123. <https://doi.org/10.3390/nu12041123>

Salas, S. & Moscote, J. G. (2023). Extractos proteicos en la flor del plátano: un estudio preliminar de su uso como biomateriales de interés en la industria de alimentos. [Monografía]. Repositorio Institucional UNAD. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/54830>

Tena, N., & Asuero, A. G. (2022). Up-To-Date Analysis of the Extraction Methods for Anthocyanins: Principles of the Techniques, Optimization, Technical Progress, and Industrial Application. *Antioxidants (Basel, Switzerland)*, 11(2), 286.
<https://doi.org/10.3390/antiox11020286>

Wardani, N. I., Alahmad, W., & Varanusupakul, P. (2024). A review of utilizing anthocyanins as natural reagents for eco-friendly solid-state colorimetric sensors: A green perspective. *Green Analytical Chemistry*, 9, 100117.
<https://doi.org/10.1016/j.greeac.2024.100117>

Zhang, Y., Hawboldt, K., & MacQuarrie, S. (2024). Extraction of bioactive compounds from beach-cast brown algae: a review on accelerated solvent extraction and subcritical water extraction. *RSC Sustainability*.

Apéndices

Apéndice A.

Registro de variables durante el proceso de secado de la cáscara de cacao

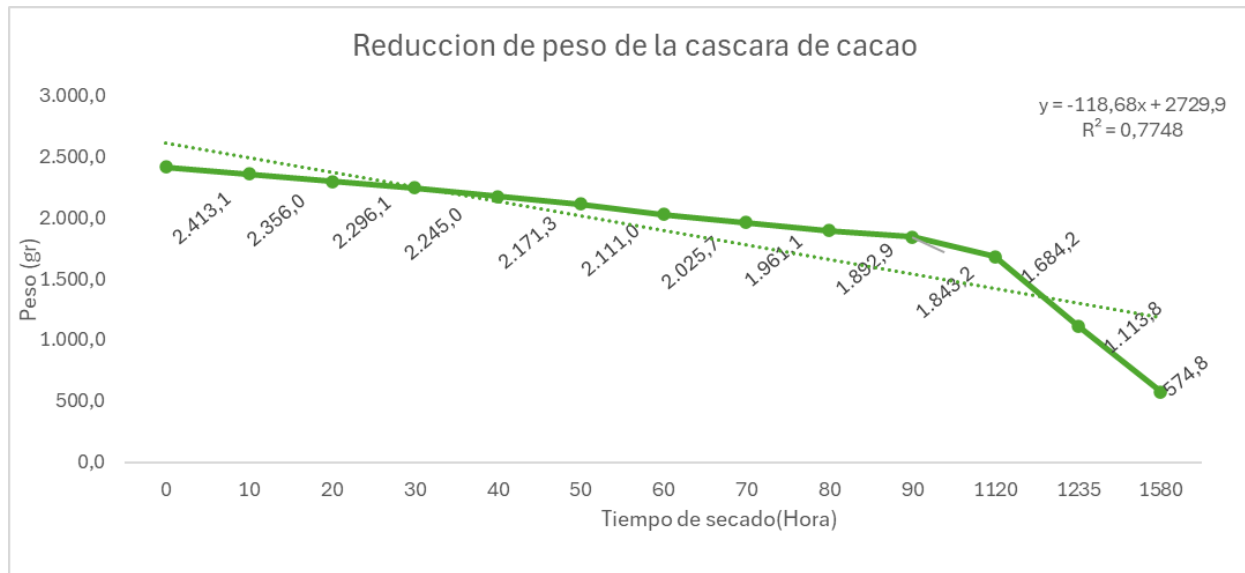
Control	Tiempo transcurrido (min)	Peso (gr)	Peso de las bandejas (gr)	Peso de la cáscara (gr)	Temperatura de entrada (°C)	Velocidad aire (m/s)	Temperatura de Salida (°C)	Humedad Relativa (%)
1	0	3.826,1	1.413	2.413,1	45,4	1,9	43	20,4
2	10	3.769,0	1.413	2.356	50,6	2,0	44,7	22,6
3	20	3.709,1	1.413	2.296,1	51,4	2,0	47,2	22
4	30	3.658	1.413	2.245	52,8	2,0	47,7	22,3
5	40	3.584,3	1.413	2.171,3	51,3	2,0	48,7	18,4
6	50	3.524	1.413	2.111	51,4	2,0	49,1	19,0
7	60	3.438,7	1.413	2.025,7	52,7	2,0	49,2	20,8
8	70	3.374,1	1.413	1.961,1	52,1	2,0	48,8	19,9
9	80	3.305,9	1.413	1.892,9	52,3	2,0	49	19,2

10	90	3.256,2	1.413	1.843,2	56	2,0	50,6	21,0
11	1120	3.097,3	1.413	1.684,2	26,3	0,5	24,0	68
12	1235	2.526,8	1.413	1.113,8	49,9	2,0	48,7	22
13	1580	1.987,8	1.413	574,8	51,3	2,0	49	22

Nota. Se registraron variables durante el proceso de secado de la cáscara de cacao peso, temperatura de entrada y salida, velocidad del aire y humedad relativa. El peso de la cáscara de cacao se determinó por diferencia con el peso de las bandejas. *Fuente.* Autoría propia.

Apéndice B.

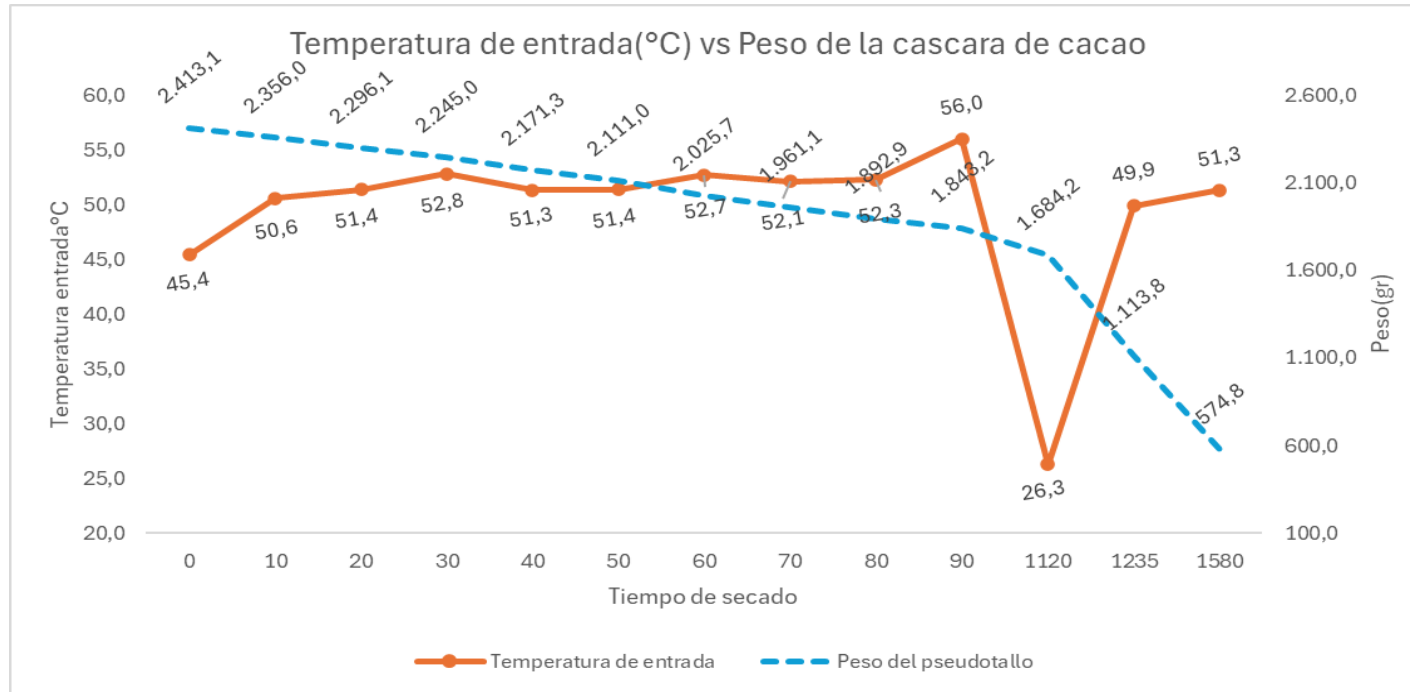
Reducción de peso de la cáscara de cacao durante el tiempo de secado



Nota. Elaboración propia a partir de datos experimentales registrado. La tendencia de reducción de peso fue ajustada mediante regresión lineal, con un coeficiente de determinación de $R^2 = 0,7748$. Fuente. *Autoría propia.*

Apéndice C

Efecto de la temperatura de secado sobre el peso de la cáscara de cacao



Nota. Elaboración propia a partir de datos experimentales registrados. La gráfica muestra la evolución simultánea de la temperatura de entrada del aire caliente y la pérdida de peso de la cáscara de cacao a lo largo del proceso de secado. Se observa un comportamiento inversamente proporcional entre ambas variables. Fuente. *Autoría propia.*

Apéndice D

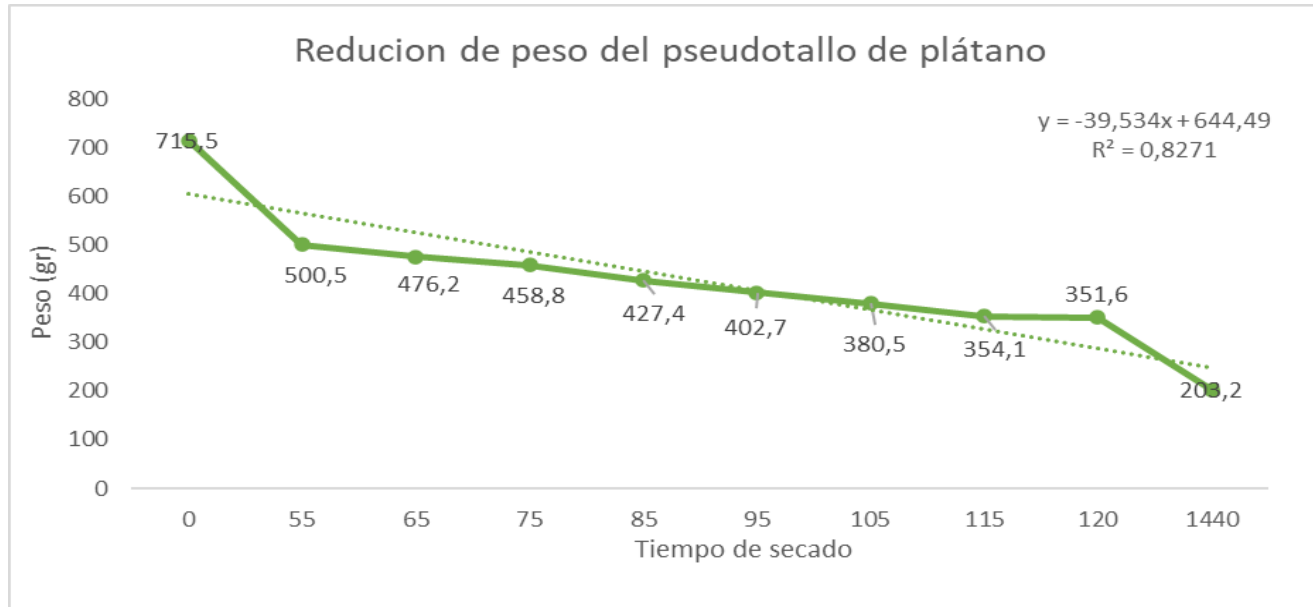
Registro de variables durante el proceso de secado de pseudotallo de plátano

Control	Tiempo transcurrido (min)	Peso (gr)	Peso de las bandejas (gr)	Peso del pseudotallo (gr)	Temperatura de entrada (°C)	Velocidad aire (m/s)	Temperatura de Salida (°C)	Humedad Relativa (%)
1	0	2.128,5	1.413	715,5	25,0	1,9	25,5	40,0
2	55	1.913,5	1.413	500,5	49,2	2,0	47,7	27,6
3	65	1.889,2	1.413	476,2	49,2	2,0	47,9	26,8
4	75	1.871,8	1.413	458,8	50,2	2,0	48,8	26,3
5	85	1.840,4	1.413	427,4	50,4	2,0	49,1	26,3
6	95	1.815,7	1.413	402,7	49,8	2,0	48,8	25,5
7	105	1.793,5	1.413	380,5	50,4	2,0	49,3	25,3
8	115	1.767,1	1.413	354,1	49,8	2,0	48,8	25,0
9	120	1.764,6	1.413	351,6	49,5	2,1	48,6	25,2
10	1440	1.616,2	1.413	203,2	25,6	0,5	25,0	70

Nota. Se registraron variables durante el proceso de secado del pseudotallo: peso, temperatura de entrada y salida, velocidad del aire y humedad relativa. El peso del pseudotallo se determinó por diferencia con el peso de las bandejas. *Fuente.* Autoría propia.

Apéndice E

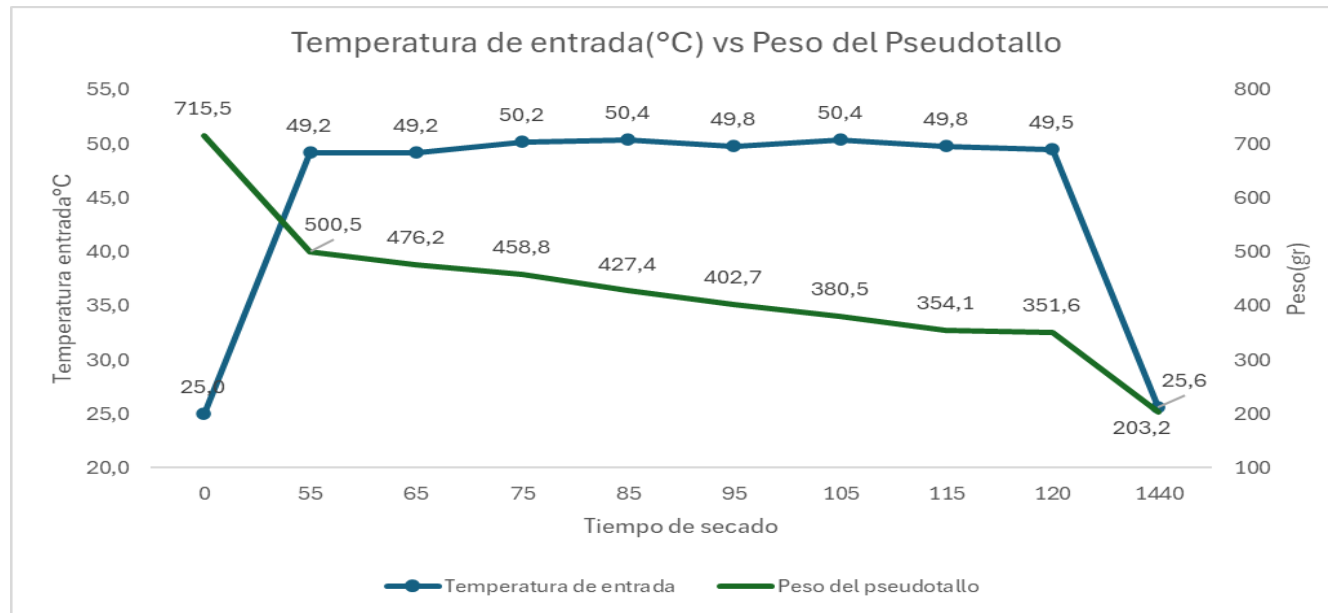
Reducción de peso del pseudotallo de plátano durante el tiempo de secado



Nota. Elaboración propia a partir de datos experimentales registrado. La tendencia de reducción de peso fue ajustada mediante regresión lineal, con un coeficiente de determinación de $R^2 = 0,8271$. *Fuente.* Autoría propia.

Apéndice F

Efecto de la temperatura de secado sobre el peso del pseudotallo del plátano



Nota. Elaboración propia a partir de datos experimentales registrados. La gráfica muestra la evolución simultánea de la temperatura de entrada del aire caliente y la pérdida de peso del pseudotallo a lo largo del proceso de secado. Se observa una tendencia inversa.

Fuente. Autoría propia.

Apéndice G

Resultados de los análisis proximal de la cáscara de cacao

Parámetro	M1	M2	M3	M4	M5	Promedio	Desviación Estándar	Varianza	CV (%)
Humedad (%)	9,765	9,850	9,905	9,925	9,821	9,853	0,0644	0,0041	0,6532
Cenizas (%)	6,739	6,772	6,692	6,691	6,841	6,7467	0,0627	0,0039	0,9289
Proteína Cruda (%)	2,996	3,575	3,524	3,550	3,522	3,4216	0,2759	0,0761	8,0627
Grasa Cruda (%)	2,116	2,190	2,147	2,135	2,172	2,1628	0,0446	0,0020	2,0599

Nota. Los resultados corresponden al análisis proximal de la cáscara de cacao realizado por quintuplicado (n = 5). Se presentan los valores obtenidos para cada réplica experimental. *Fuente.* Autoría propia.

Apéndice H

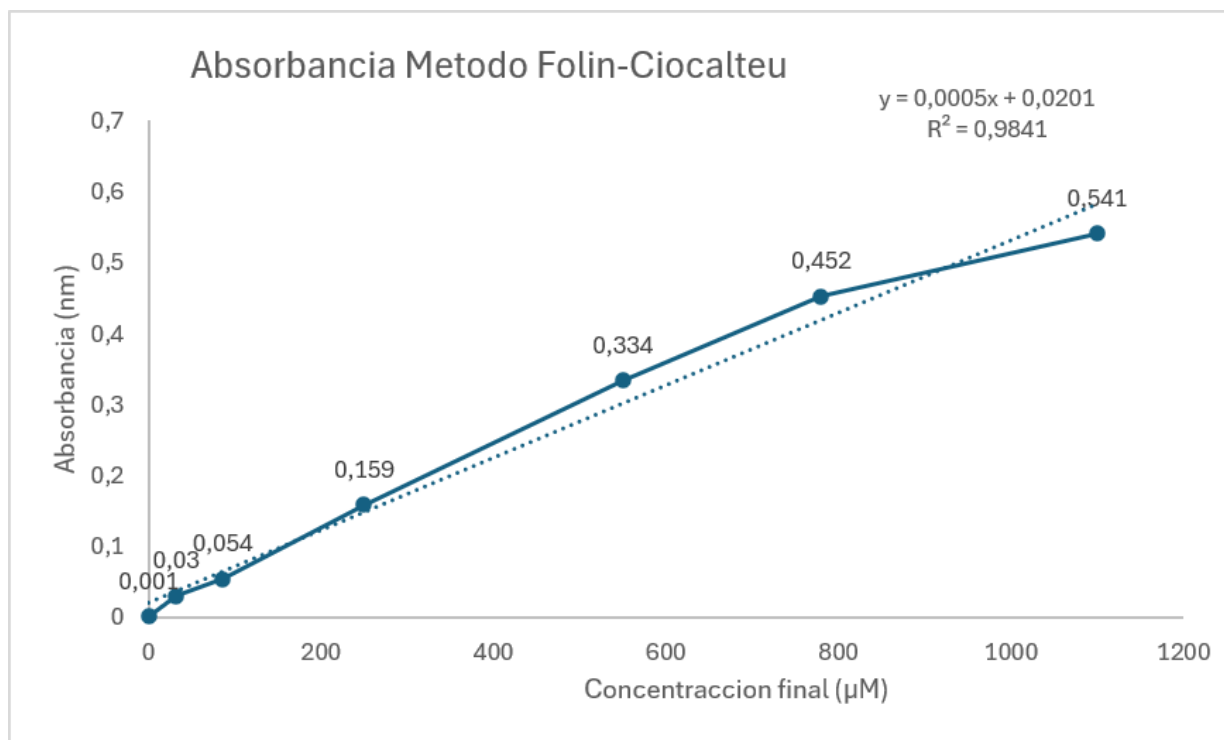
Resultados de los análisis proximal del pseudotallo de plátano

Parámetro	M1	M2	M3	M4	M5	Promedio	Desviación Estándar	Varianza	CV (%)
Humedad (%)	8,774	8,985	8,887	8,743	8,885	8,855	0,0973	0,0095	1,0987
Cenizas (%)	5,76	5,79	5,66	5,76	5,80	5,76	0,056	0,0031	0,97
Proteína Cruda (%)	0,949	1,009	1,078	1,071	1,012	1,0236	0,0527	0,0028	5,14
Grasa Cruda (%)	0,994	0,933	0,960	0,950	0,959	0,959	0,0007	2,67	2,67

Nota. Los resultados corresponden al análisis proximal de la cáscara de cacao realizado por quintuplicado (n = 5). Se presentan los valores obtenidos para cada réplica experimental. *Fuente.* Autoría propia.

Apéndice I

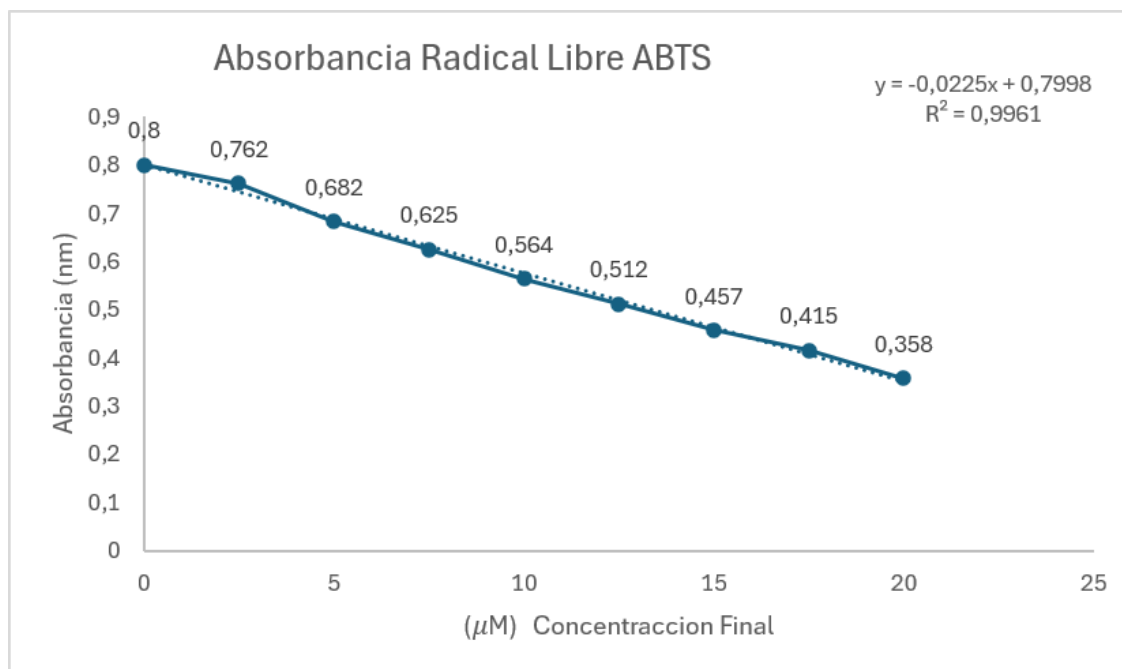
Curva de calibración para la determinación de compuestos fenólicos totales mediante el método de Folin-Ciocalteu.



Nota. La curva de calibración se construyó utilizando ácido gálico como estándar, en un rango de concentración de 0 a 1100 μM , obteniéndose una ecuación de regresión lineal de $y=0,0005x+0,0201$ y un coeficiente de determinación de $R^2=0,9841$. *Fuente.* Autoría propia.

Apéndice J

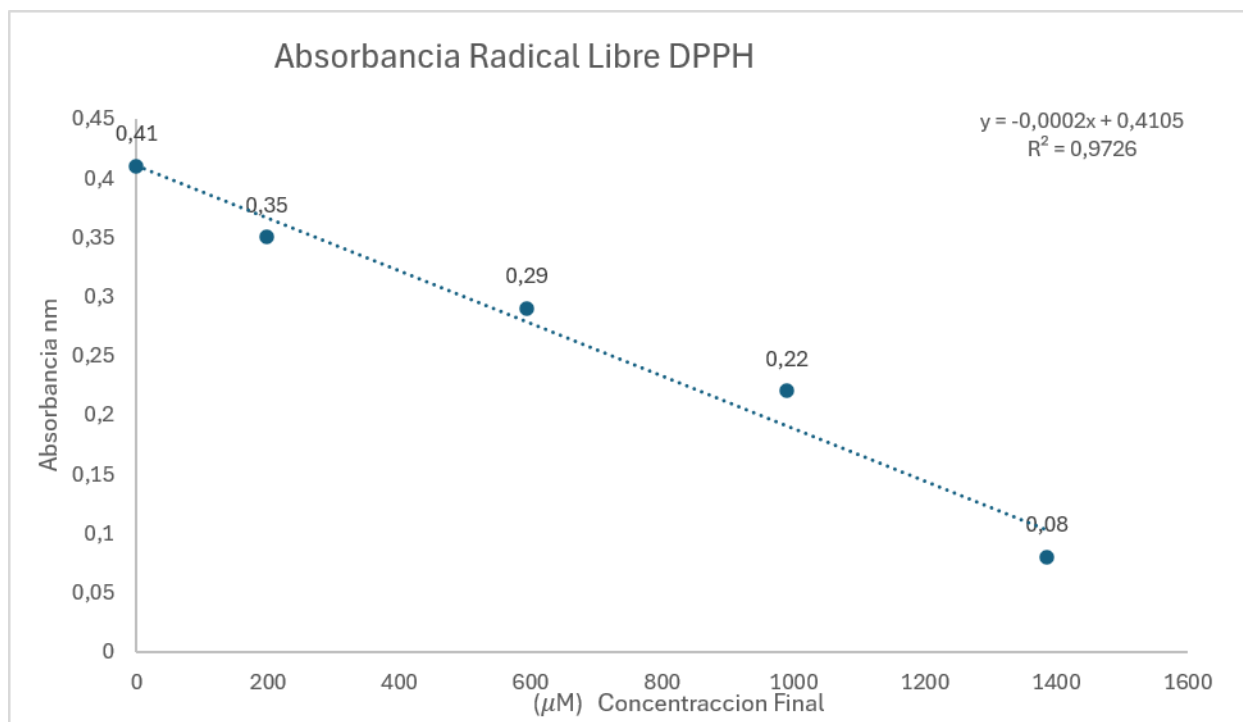
Curva de calibración del radical libre ABTS.



Nota. La curva de calibración se construyó utilizando trolox como estándar, en un rango de concentración de 0 a 20 µM, obteniéndose una ecuación de regresión lineal de $y = -0,0225x + 0,07998$ y un coeficiente de determinación de $R^2 = 0,9961$. *Fuente.* Autoría propia.

Apéndice K

Curva de calibración del radical libre DPPH.



Nota. La curva de calibración se construyó utilizando trolox como estándar, en un rango de concentración de 0 a 1385,66 µM, obteniéndose una ecuación de regresión lineal de $y = -0,0002x + 0,4105$ y un coeficiente de determinación de $R^2 = 0,9726$. *Fuente.*

Autoría propia.

Apéndice L

Horno de secado por convección modelo CE130 de la marca GUNT Hamburg



Apéndice M*Procesador de alimentos Robot Coupé R2*

Apéndice N

Mufla Terrígeno M10 , Desecador



Apéndice O*Fat Analyzer TT-SOX406*

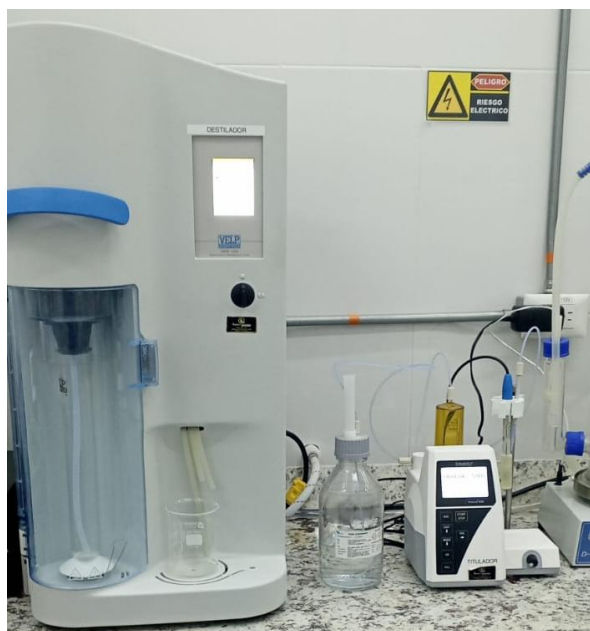
Apéndice P

Sistema en línea de digestión del Velp Scientifica DKL 8 Heating digestion



Apéndice Q

Sistema en línea de destilación automático UDK 149



Apéndice R

Titulador automático TitroLine 5000



Apéndice S

Baño ultrasónico BioBase Digital Ultrasonic Cleaner Digital Pro

