

Tecnologías emergentes para la extracción de compuestos a partir de residuos del cacao: una revisión bibliográfica

<https://doi.org/10.18041/1900-3803/entramado.1.12100>

Luisa Fernanda Perea-Salazar 

Universidad de Cartagena, Cartagena - Colombia

Martha Cuenca-Quicazán 

Universidad de Cartagena, Cartagena - Colombia

Alexis López-Padilla 

Universidad de Cartagena, Cartagena - Colombia

Resumen

La valorización de los residuos del cacao es relevante por su potencial para extraer compuestos bioactivos y pectinas de alto valor. Esta revisión se centra en tecnologías no convencionales de extracción aplicadas a los residuos de cacao (*Theobroma cacao L.*) como la cáscara de la vaina y del grano. Se aplicó el método analítico para revisiones sistemáticas, lo que implica la asignación de escalas de valores a los documentos obtenidos en la búsqueda bibliográfica. Se utilizaron las bases de datos Google Scholar, Scopus y ScienceDirect, seleccionando 48 documentos de 53.296 encontrados. El análisis resalta la importancia de la innovación tecnológica para obtener compuestos valiosos, promoviendo una gestión responsable de los recursos naturales. Los métodos convencionales de extracción presentan desafíos como tiempos prolongados y uso de disolventes tóxicos. En contraste, los métodos no convencionales, como la extracción asistida por ultrasonido, fluidos supercríticos, microondas, enzimas y líquidos presurizados, ofrecen ventajas como la reducción de tiempos y el uso de disolventes ecológicos. Se concluye que la innovación tecnológica en la extracción de compuestos de los residuos de cacao mediante técnicas no convencionales representa una oportunidad para transformar subproductos en recursos valiosos, promoviendo prácticas más sostenibles en la industria. Hacia futuro, se requiere la ejecución de estudios experimentales en este campo para optimizar la extracción de compuestos bioactivos.

Palabras clave

Cacao; residuos; química verde; valorización; extracción.

Registro

Artículo de revisión
Recibido: 01/08/2024
Aceptado: 31/10/2024
Publicado: 02/01/2025

Emerging technologies for the extraction of compounds from cocoa residues: a literature review

Abstract

The valorization of cocoa residues is relevant for its potential to extract high-value bioactive compounds and pectins. This review focuses on non-conventional extraction technologies applied to cocoa (*Theobroma cacao L.*) residues, such as pod and bean shells. The analytical method for systematic reviews was applied, which implies the assignment of value scales to the documents obtained in the literature search. Google Scholar, Scopus, and ScienceDirect databases were used, selecting 48 papers out of 53,296 found. The analysis highlights the importance of technological innovation in obtaining valuable compounds and promoting responsible management of natural resources. Conventional extraction methods present challenges such as long extraction times and the use of toxic solvents. In contrast, non-conventional methods, such as ultrasound-assisted extraction, supercritical fluids, microwaves, enzymes, and pressurized liquids, offer advantages such as reduced times and the use of environmentally friendly solvents. It is concluded that technological innovation in the extraction of compounds from cocoa residues using non-conventional techniques represents an opportunity to transform by-products into valuable resources, promoting more sustainable practices in the industry. In the future, experimental studies in this field are required to optimize the extraction of bioactive compounds.

Keywords

Cocoa; residues; green chemistry; valorization; extraction.

License



Cómo citar este artículo

PEREA-SALAZAR, Luisa Fernanda; CUENCA-QUICAZÁN, Martha; LÓPEZ-PADILLA, Alexis. Tecnologías emergentes para la extracción de compuestos a partir de residuos del cacao: una revisión bibliográfica. En: Entramado. Enero - junio, 2025. vol. 21, no. 1 e-12100 p. 1-16.
<https://doi.org/10.18041/1900-3803/entramado.1.12100>

1. Introducción

Colombia figura entre los países reconocidos a nivel global por su significativa producción de cacao (*Theobroma cacao* L.), disponiendo de aproximadamente más de 176.000 hectáreas de terreno cultivado con cacao en más de 30 departamentos. En tiempos recientes, ha demostrado rendimientos históricos en la producción de cacao, registrando niveles que superan las 68.000 toneladas anuales ([González, 2021](#)). En la jerarquía de los mayores productores de cacao a nivel mundial, Colombia se ubica en la novena posición entre diez, y, adicionalmente, es responsable de la generación del 76% del cacao clasificado como "fino de aroma". Este tipo de cacao, a su vez, constituye entre el 6% y el 7% de la producción total de cacao a nivel global ([Procolombia, 2016](#)).

Minimizar los residuos constituye uno de los pilares fundamentales de la economía circular, una filosofía que se esfuerza por transformar los productos en el final de su ciclo de manufactura en recursos útiles para otros propósitos, logrando así cerrar los bucles en los sistemas industriales y ecosistemas ([Stahel, 2016](#)). Los desechos orgánicos, como las cáscaras, conchas y pieles, forman parte esencial de los materiales remanentes que actualmente se están examinando en términos de reciclaje en el ámbito de la industria agroalimentaria. Este enfoque lleva a la recuperación consecuente de metabolitos de importancia primaria y secundaria, confiriéndoles un alto valor ([Grillo et al., 2019](#)). Es importante resaltar que en el procedimiento de producción y procesamiento del cacao, los granos de cacao mismos solo representan aproximadamente un tercio del peso total del fruto del cacao ([Oddoye, Agyente-Badu, y Gyedu-Akoto, 2013](#)). Sin embargo, lo que con frecuencia pasa inadvertido es la considerable cantidad de desechos generados por la industria cacaotera. Estos subproductos suelen ser considerados como inconvenientes y, lamentablemente, suelen ser descartados en los campos de las plantaciones de cacao en lugar de ser aprovechados de manera eficaz.

Este enfoque de desecho no solo pasa por alto el potencial económico y ecológico de estos subproductos, sino que también resulta en impactos ambientales significativos. En un contexto en el cual la sostenibilidad y la mitigación del cambio climático son de suma importancia, la falta de aprovechamiento de los recursos derivados de la producción de cacao se convierte en un problema evidente. La composición orgánica y la humedad inherente de estos subproductos generan condiciones propicias para la descomposición bacteriana, dando lugar a la liberación de gases de efecto invernadero como lo son el dióxido de carbono y el metano, los cuales contribuyen sustancialmente al calentamiento global y sus ramificaciones dañinas ([Hansen y Cheong, 2019](#)).

En respuesta a esta preocupación, en los últimos veinticinco años se ha experimentado un interés en constante aumento en el desarrollo y la implementación de tecnologías emergentes que permitan la extracción y valorización de compuestos bioactivos y pectinas presentes en los residuos del cacao. Estos compuestos, con propiedades nutricionales y funcionales significativas, poseen un potencial aprovechable en la industria alimentaria, farmacéutica y de cosméticos ([Panić et al., 2020](#)).

Este artículo de revisión explora y analiza críticamente las tecnologías emergentes para la extracción de compuestos bioactivos y pectinas de los residuos del cacao en la última década, impulsado por la creciente conciencia ambiental y la demanda de ingredientes naturales y saludables. Se reportan metodologías recientes, evaluando sus ventajas y desafíos, y se discuten sus aplicaciones y perspectivas en diversas industrias, con el objetivo de proporcionar una visión integral de la evolución y el potencial de estas tecnologías en la revalorización de los residuos del cacao, contribuyendo a una gestión más sostenible y a la generación de productos con beneficios para la salud y el bienestar humano. Este estudio, que puede servir de base para mejorar la eficiencia y calidad del proceso, busca impactar directamente en industrias como la alimentaria, inspirando el desarrollo de nuevos productos derivados de los residuos de cacao y enriqueciendo la literatura científica para futuras investigaciones. Adicionalmente, la implementación de tecnologías no convencionales en la extracción de residuos de cacao promueve la sostenibilidad, impulsa la innovación y genera soluciones prácticas que benefician tanto a la industria como al medio ambiente, abriendo nuevas oportunidades económicas y contribuyendo a una industria más sostenible y eficiente.

2. Metodología

La metodología de este estudio se basó en el enfoque analítico de [Páramo. \(2020\)](#) y [Uman. \(2011\)](#) para revisiones sistemáticas, el cual implica la asignación de escalas de valores a los documentos obtenidos en la búsqueda bibliográfica.

2.1. Planteamiento de preguntas de investigación

El análisis se realizó siguiendo un proceso detallado que incluyó la formulación de preguntas de investigación específicas, las cuales se presentan a continuación:

PI1: ¿Cuáles son los residuos generados en las etapas de preprocesamiento y procesamiento del cacao y cómo se caracterizan?

PI2: ¿Cuáles son las diferentes tecnologías emergentes de extracción que se aplican para la obtención de componentes presentes en los residuos de cacao, y qué beneficios presentan estos métodos ante las tecnologías convencionales?

PI3: ¿Qué productos se pueden generar a partir de los extractos obtenidos en los subproductos del cacao?

2.2. Cadenas de búsqueda

Partiendo de las preguntas de investigación formuladas, se estableció la siguiente cadena de búsqueda general para su implementación en las bases de datos: ("extraction")AND ("cocoa")AND ("non conventional" OR "emerging") AND ("waste" OR "residues") AND ("valorization" OR "utilization"). Esto con el fin de llevar a cabo un análisis de las publicaciones científicas concernientes a la temática principal, mediante la realización de un estudio bibliométrico para la evaluación de la actividad científica, para así conocer los autores, el impacto y la visibilidad de un tema en el rango de tiempo establecido.

2.3. Fuentes de información

Teniendo en cuenta la disponibilidad de las bases de datos, se reportan a continuación aquellas utilizadas para el presente estudio. Se emplearon Google Scholar, Scopus y ScienceDirect, incluyendo palabras clave en inglés: "extraction technologies", "cocoa", "waste", "emerging", "non conventional" y "valorization", buscando artículos entre 2013-2023, ordenados por relevancia, incluyendo citas, patentes y artículos.

2.4. Selección de la bibliografía

Para la selección de documentos se aplicaron criterios de inclusión y exclusión, los cuales se presentan a continuación:

Criterios de inclusión

- Estudios originales y publicaciones científicas, como artículos de revistas, tesis doctorales y trabajos de conferencias, que investiguen la temática y den respuesta a los objetivos planteados.
- Estudios que describieran y aplicaran tecnologías emergentes de extracción serán considerados para su inclusión.
- Estudios que traten sobre la utilización y valorización de una variedad de residuos de cacao.
- Estudios que investiguen diversas aplicaciones de los compuestos de alta valía obtenidos a partir de residuos de cacao serán incluidos, tales como alimentos funcionales, ingredientes cosméticos, productos farmacéuticos, entre otros.

Criterios de exclusión

- Estudios que no estén directamente relacionados con la temática.

- Estudios que se centren exclusivamente en el cacao como materia prima principal, en lugar de sus residuos, ya que el enfoque principal es la valorización de los subproductos.
- Estudios que investiguen netamente tecnologías convencionales de extracción, para mantener la coherencia con el enfoque de tecnologías no convencionales.
- Estudios con un alcance muy limitado, como investigaciones preliminares sin resultados sustanciales para asegurar la inclusión de investigaciones significativas y robustas.

Posteriormente, se llevó a cabo la selección de la información de acuerdo con los indicadores para valoración de la bibliografía, los cuales asignaban un puntaje de 1 a 5, los cuales se presentan en la [Tabla 1](#). Se excluyeron estudios no relacionados con los criterios establecidos y se eliminaron los artículos científicos duplicados.

Tabla 1.

Se excluyeron estudios no relacionados con los criterios establecidos y se eliminaron los artículos científicos duplicados.

Escala	Indicador	Descripción
1	Deficiente	El documento presenta serias carencias en metodología, revisión bibliográfica y presentación de resultados, comprometiendo la confiabilidad de los hallazgos.
2	Insuficiente	El documento muestra deficiencias notables en enfoque y calidad, con metodología insuficiente o poco clara que afecta la validez de los resultados.
3	Regular	El documento presenta un enfoque básico y contenido limitado, con una metodología que podría ser más detallada y una revisión bibliográfica que podría ser más exhaustiva.
4	Bueno	El documento presenta una aproximación adecuada al tema, demuestra rigor y profundidad, y utiliza una metodología adecuada que respalda los hallazgos.
5	Excelente	El documento se destaca por su rigurosidad y profundidad, respaldado por una metodología sólida y bien estructurada, una revisión exhaustiva de la literatura, y resultados claros y significativos.

Fuente: Elaboración propia

A partir de los documentos recopilados, se consideraron cinco criterios para su evaluación, los cuales se presentan a continuación:

- **Criterio 1:** El documento describe las tecnologías no convencionales de extracción para la valorización de residuos de cacao.
- **Criterio 2:** El documento está relacionado con la temática de la revisión y permite dar respuesta a alguno de los objetivos planteados.
- **Criterio 3:** La estructura del documento es organizada, coherente, y tiene un uso adecuado de la terminología técnica y la jerga del campo
- **Criterio 4:** El documento emplea fuentes confiables e información actualizada.
- **Criterio 5:** El documento cuenta con un análisis de resultados basado en datos de estudios.

Después, se generó la [Tabla 2](#), en la cual sólo se incluyen aquellos documentos que al menos cumplieron con cuatro (4) de estos criterios.

Tabla 2.

Criterios de evaluación bibliográfica

Referencia			Criterios					Total
Título	Año	Autor(es)	1	2	3	4	5	

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se procedió con la redacción, enfocándose en el análisis y discusión de la información relevante sobre tecnologías no convencionales de extracción y su aplicación en residuos de cacao, con el objetivo de proporcionar un documento que sirva como base para la realización de futuras investigaciones en el tema.

3. Desarrollo y discusión

En la [Tabla 3](#), se muestra el número de consultas realizadas en cada base de datos y la cantidad de documentos evaluados al depurar su contenido de acuerdo con las preguntas de investigación formuladas. Se obtuvieron un total de 53.296 fuentes primarias de información y, siguiendo la metodología descrita, solamente 48 documentos que cumplieron con al menos 4 de los criterios establecidos, como se presentan en la [Tabla 4](#).

Tabla 3.

Segregación implementada en el estudio bibliométrico

Base de datos	PI1	PI2	PI3	Total
Scopus	11.500	12.900	4.968	29.368
Science Direct	1.960	1.338	336	3.634
Google Scholar	2.028	2.366	15.900	20.294

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.

Documentos que cumplieron con mínimo 4 criterios

No.	Referencia / Autor(es)	Criterio					Total
		1	2	3	4	5	
1	Soares y Oliveira (2022)	0	1	1	1	1	4
2	Picot-Allain, Mahomoodally, Ak y Zengin (2021)	0	1	1	1	1	4
3	Freitas et al. (2021)	0	1	1	1	1	4
4	Pagano et al. (2021)	0	1	1	1	1	4
5	More et al. (2022)	0	1	1	1	1	4
6	Anticon, Blesa, Frigola y Esteve (2020)	0	1	1	1	1	4
7	Mellinas, Jiménez, y Garrigós (2020)	1	1	1	1	1	5
8	Mariatti, Gunjević, Boffa y Cravotto (2021)	1	1	1	1	1	5
9	Londoño-Larrea, Villamarin-Barriga, García, y Marcilla (2022)	0	1	1	1	1	4
10	Ganesh, Sridhar y Vishali (2022)	0	1	1	1	1	4
11	Okiyama, Navarro y Rodrigues (2017)	0	1	1	1	1	4
12	Predan, Lazăr, y Lungu (2019)	0	1	1	1	1	4
13	Gutiérrez (2017)	0	1	1	1	1	4
14	Dzelagha, Ngwa, y Bup (2020)	0	1	1	1	1	4
15	Fowler y Coutel (2017)	0	1	1	1	1	4
16	Misailidis y Petrides (2020)	0	1	1	1	1	4
17	Guda y Gadhe (2017)	0	1	1	1	1	4
18	Campos-Vega, Nieto-Figueroa y Oomah (2018)	0	1	1	1	1	4
19	Lu et al. (2018)	0	1	1	1	1	4
20	Pavlović et al. (2020)	1	1	1	1	1	5
21	Osorio-Tobón (2020)	0	1	1	1	1	4
22	Sarah, Hasibuan, Misran y Maulina (2022)	1	1	1	1	1	5

Continúa en la página siguiente

23	Venkatanagaraju et al. (2020)	0	1	1	1	1	4
24	Azmir et al. (2013)	0	1	1	1	1	4
25	Adetunji, Adekunle, Orsat, Raghavan (2017)	0	1	1	1	1	4
26	Ojha, Aznar, O'Donnell y Tiwari (2020)	0	1	1	1	1	4
27	Pavlović, Jakovljević, Molnar y Jokić (2021)	1	1	1	1	1	5
28	Manuela et al. (2020)	0	1	1	1	1	4
29	Tambun, Alexander y Ginting (2021)	0	1	1	1	1	4
30	Wen et al. (2020)	1	1	1	1	1	5
31	Belwal et al. (2022)	0	1	1	1	1	4
32	Sridhar et al. (2021)	1	1	1	1	1	5
33	Hennessey-Ramos, Murillo-Arango, Vasco-Correa, y Paz Astudillo, (2021)	1	1	1	1	1	5
34	Okiyama et al. (2018)	1	1	1	1	1	5
35	Mazzutti et al. (2018)	1	1	1	1	1	5
36	Rebollo-Hernanz et al. (2021)	1	1	1	1	1	5
37	Manzano et al. (2017)	0	1	1	1	1	4
38	Reichembach y Petkowicz (2021)	0	1	1	1	1	4
39	Barrios-Rodríguez et al. (2022)	0	1	1	1	1	4
40	Vásquez et al. (2019)	0	1	1	1	1	4
41	Osorio, Flórez-López y Grande-Tovar (2021)	0	1	1	1	1	4
42	Balentic et al. (2018)	0	1	1	1	1	4
43	Adi-Dako et al. (2016)	0	1	1	1	1	4
44	Ahangari, King, Ehsani y Yousefi (2021)	0	1	1	1	1	4
45	Da Silva, Rocha-Santos y Duarte (2016)	1	1	1	1	1	5
46	Pico Hernández, Jaimes Estévez, López Giraldo y Murillo Méndez (2019)	1	1	1	1	1	5
47	Valadez-Carmona et al. (2018)	1	1	1	1	1	5
48	Pangestu et al. (2020)	1	1	1	1	1	5

Fuente: Elaboración propia

Con base en estos documentos seleccionados bajo los criterios establecidos, se procedió a extraer la información relevante, la cual fue organizada en diferentes apartados, como se presentan a continuación.

3.1 Etapas de preprocesamiento y procesamiento del cacao.

El ciclo de producción del cacao se compone de etapas cruciales, las cuales aseguran la calidad del producto final. Desde la siembra hasta la cosecha, y a través de la fermentación, el secado y el tratamiento de los granos, cada paso es vital para obtener un cacao de excelencia ([Álvarez, Vera e Ibañez, 2021](#)).

El preprocesamiento del cacao transforma los frutos maduros en granos de alta calidad mediante varias etapas. Inicialmente, la cosecha selecciona las vainas maduras, evitando dañar las vainas y las flores ([Guda y Gadhe, 2017](#)). Luego, la apertura de la vaina extrae los granos, seleccionando solo aquellos sin signos de deterioro ([Guda y Gadhe, 2017](#)). La fermentación descompone la pulpa, desarrollando sabores y aromas distintivos ([Predan, Lazâr y Lunghu, 2019](#)). El secado reduce la humedad de los granos fermentados al 5-8% para prevenir el moho ([Dzelagha, Ngwa y Bup, 2020](#)). Finalmente, el almacenamiento mantiene la calidad de los granos secos en condiciones adecuadas, evitando la humedad y la adsorción de olores y aromas ([Fowler y Coutel, 2017](#)).

El procesamiento del cacao comienza con la limpieza de los granos para eliminar impurezas ([Gutiérrez, 2017](#)). El tostado desarrolla compuestos aromáticos y reduce la humedad, influyendo en el sabor y

facilitando la separación de las cáscaras (Gutiérrez, 2017). La eliminación de las cáscaras obtiene nibs, que se muelen para formar masa de cacao (Gutiérrez, 2017). El licor de cacao se produce calentando y triturando la masa (Misailidis y Petrides, 2020). Estas etapas, tanto en el preprocesamiento como en el procesamiento, son cruciales para la producción de cacao de alta calidad y su transformación en productos finales como el chocolate.

En la Figura 1 se presentan las etapas del ciclo de transformación del cacao junto con los residuos generados en cada una de ellas, donde es clara la generación de residuo de la cáscara de la vaina en la etapa del procesamiento, y la generación de residuo de cáscara del grano en la etapa de procesamiento.

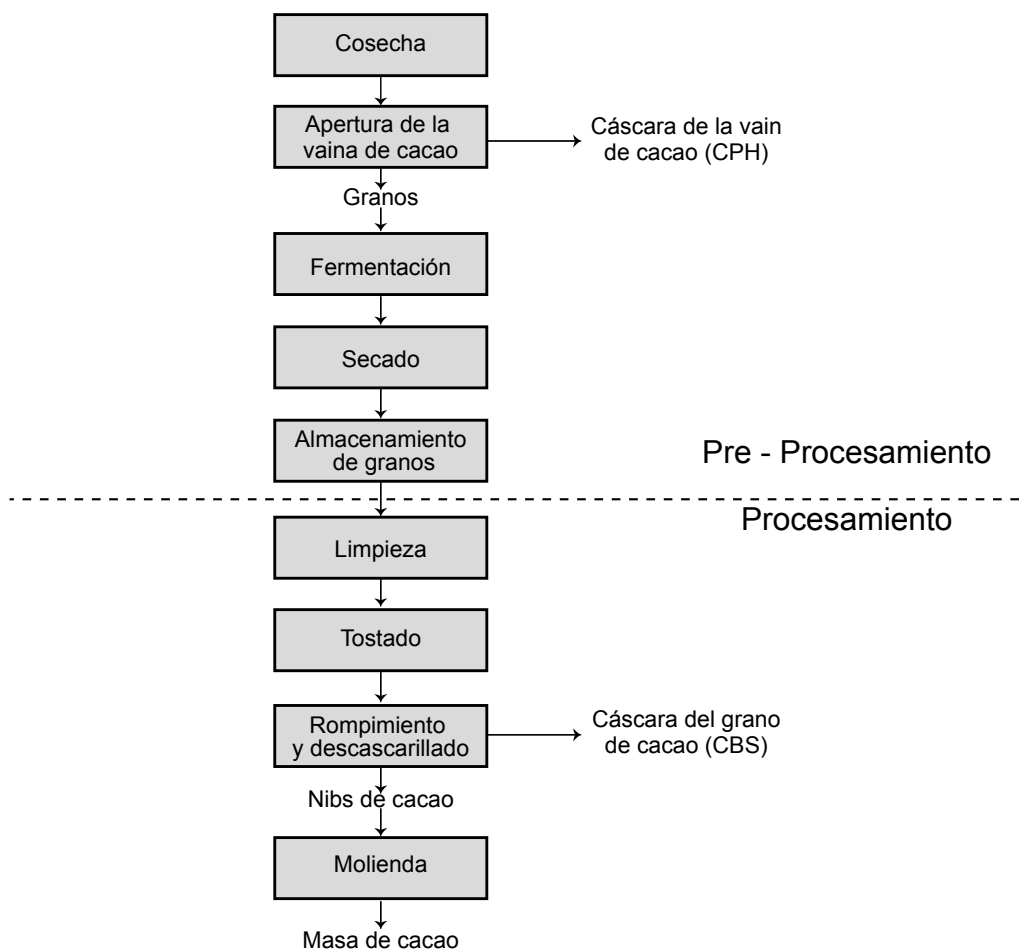


Figura 1. Etapas de preprocesamiento y procesamiento del cacao y residuos generados.

Fuente: Elaboración propia

3.2 Caracterización de la cáscara de la vaina de cacao y de la cáscara del grano de cacao.

Tanto la cáscara de la vaina de cacao como la cáscara del grano son subproductos valiosos, ricos en diversos componentes con un amplio espectro de aplicaciones. La cáscara de la vaina, que representa más del 76% del peso seco del fruto, es una fuente abundante de fibra dietética, incluyendo fracciones solubles como la pectina y el β -glucano, e insolubles como la lignina y la celulosa. Además, contiene antioxidantes, minerales, teobromina y polisacáridos no amiláceos como la hemicelulosa. Por otro lado, la cáscara del grano de cacao alberga fibras dietéticas (celulosa, hemicelulosa, pectinas, lignina), proteínas, carbohidratos, metilxantinas (teobromina, cafeína, teofilina), lípidos y compuestos fenólicos. Destaca por

su bajo contenido de azúcares solubles y alto contenido fibroso, superando incluso al de los nibs, y los compuestos fenólicos presentes, con propiedades antioxidantes, la hacen útil en la industria alimentaria ([Okiyama, Navarro y Rodrigues, 2017](#)). En la Tabla 5 se presenta la composición de ambos residuos.

Tabla 5.

Caracterización de la cáscara de la vaina del cacao y de la cáscara del grano de cacao.

Compuestos	Cáscara de la vaina del cacao (% en base seca)	Cáscara del grano de cacao (% en base seca)
Carbohidratos	29,04 – 32,30	17,80 – 23,17
Celulosa	24,24 – 35,00	15,10
Hemicelulosa	8,72 – 11,00	-
Lignina	14,60 – 26,38	32,41
Pectina	6,10 – 9,20	0,57 – 1,50
Fibra dietética total	36,60 – 56,10	18,60 – 60,60
Proteína total	4,21 – 10,74	15,79 – 18,10
Lípidos	1,50 – 2,24	2,02 – 6,87
Cenizas	6,70 – 10,02	5,96 – 11,42
Minerales	3,23085	0,05675 - 0,31257
Ácidos orgánicos totales	-	-
Fenoles totales	4,60 – 6,90	1,32 – 5,78
Antocianinas	-	4×10^{-7}
Teobromina	0,34	1,30
Cafeína	-	0,10
Taninos	5,20	3,30 – 4,46
Flavonoles	-	1,50

Fuente: Adaptado de ([Soares y Oliveira, 2022](#))

Los subproductos de la cáscara de la vaina de cacao, que a menudo se descartan tras la separación de los granos, pueden aprovecharse de múltiples maneras. En la agricultura, pueden utilizarse como fertilizante orgánico, enriqueciendo el suelo con materia orgánica y nutrientes tras su descomposición. Dado que contienen fibra dietética, lignina y antioxidantes como polifenoles, la recuperación de estas fracciones y compuestos bioactivos puede generar ingresos para los agricultores y mejorar la sostenibilidad en comunidades agrícolas ([Lu et al., 2018](#)).

En la industria alimentaria, los compuestos fenólicos actúan como antioxidantes naturales, los cuales pueden prolongar la vida útil de matrices alimentarias y mejorar la calidad de los aceites ([Manzano et al., 2017](#)). Además, los compuestos bioactivos, incluidos los polifenoles, pueden enriquecer matrices alimentarias y ser utilizados como conservantes o suplementos ([Mariatti, Gunjevič, Boffa y Cravotto, 2021](#)). Las pectinas, por su parte, tienen una función primordial como agentes gelificantes, contribuyendo a la textura en mermeladas, jaleas y conservas, así como en postres, productos lácteos y panadería ([Reichembach y de Oliveira Petkovicz, 2021](#)). También se podrían utilizar como emulsionantes, estabilizando emulsiones de aceite en agua ([Barrios-Rodríguez et al., 2021](#)). Adicionalmente, se ha demostrado que esta pectina extraída de la vaina de cacao muestra propiedades antibacterianas y es adecuada como nutracéutico y excipiente farmacéutico funcional ([Adi-Dako et al, 2016](#)), lo cual hace que este compuesto pueda tener potenciales aplicaciones en la industria farmacéutica.

Los extractos de la cáscara de cacao también tienen aplicaciones en la industria cosmética, ya que pueden contribuir con la protección de la piel contra el envejecimiento y mejorar su elasticidad gracias a sus

compuestos antioxidantes ([Vásquez et al., 2019](#)). Además, los residuos de cacao pueden utilizarse en la industria farmacéutica y biomédica. Sus compuestos bioactivos, como flavonoides y antocianinas, tienen propiedades antibacterianas, antiinflamatorias e inmunomoduladoras, lo que los convierte en fuentes valiosas para medicamentos y suplementos ([Osorio, Florez-López y Grande-Tovar, 2021](#)). Se ha investigado su efecto en la prevención de caries y su actividad antibacteriana, demostrando su potencial en el cuidado bucal ([Balentić et al., 2018](#)). A pesar de su valor nutricional, el uso de la cáscara del grano en alimentos para animales es limitado debido a la teobromina y cafeína, los cuales son compuestos estimulantes, pero hay reportes en los cuales se menciona que se ha utilizado en la alimentación de cabras, peces y cerdos ([Pavlovič et al., 2020](#)). Es por ello por lo que la valorización de estos subproductos puede aumentar significativamente su utilidad en diversas aplicaciones, tanto alimentarias como no alimentarias.

Existen estudios en los cuales promueve la reutilización de residuos, la extracción de compuestos valiosos y la generación de productos sostenibles, impulsando la transición hacia una economía más circular; ([Londoño-Larrea et al., 2022](#)) exploran la descomposición térmica de la cáscara de vaina de cacao, abriendo la posibilidad de su uso como fuente de energía. ([Lu et al., 2018](#)) revisan estrategias para valorizar la cáscara y sus fracciones, maximizando el uso de recursos. ([Campos-Vega et al., 2018](#)) resaltan la cáscara como fuente de compuestos bioactivos para diversas industrias, reduciendo la dependencia de recursos no renovables. Finalmente, [Soares y Oliveira \(2022\)](#) caracterizan compuestos bioactivos en subproductos del cacao, generando productos de valor agregado.

3.3 Tecnologías no convencionales de extracción

Como se ha mencionado anteriormente, para valorizar los residuos del cacao es necesario llevar a cabo la extracción de los compuestos de interés. Esta extracción es crucial en industrias como la alimentaria y la farmacéutica, lo cual implica etapas como la penetración del solvente en el material, disolución del soluto, difusión fuera del sólido y recuperación. Factores como el solvente, tamaño de partícula, proporción solvente-sólido, temperatura y tiempo afectan la eficiencia ([Zhang, Ling y Ye, 2018](#)). Existen técnicas convencionales en la industria como la extracción de Soxhlet, maceración e hidrodestilación ([Azmir et al., 2013](#)). A pesar de que esta técnica es eficaz, Soxhlet tiene desventajas como tiempo prolongado y uso de solventes tóxicos y poco amigables con el medio ambiente ([Ramón y Gil-Garzón, 2021](#)).

Es por ello por lo que recientemente, se encuentran enfoques no convencionales con el fin de transformar la tecnología de la extracción, priorizando la eficiencia, selectividad y sostenibilidad ambiental. Los métodos de "extracción verde" buscan extractos de calidad sin impacto ambiental ni solventes tóxicos ([Mariatti, Gunjevič, Boffa y Cravotto, 2021](#)). Estos métodos contemporáneos superan la limitación temporal y de solventes de los enfoques convencionales, revolucionando la obtención de compuestos valiosos de fuentes naturales ([Lazarjani, Young, Kebede y Seyfoddin, 2021](#)). Dentro de estos métodos se encuentran: la extracción asistida por ultrasonido, la extracción enzimática asistida, la extracción asistida por microondas, la extracción con fluidos supercríticos y la extracción líquida a alta presión, las cuales se describen a continuación.

Extracción asistida por ultrasonido (EAU)

Esta técnica se basa en el uso de ondas ultrasónicas con frecuencias de 20 kHzmn y 100 kHz, que se encuentran fuera del rango de audición humana normal ([Adetunji, Adekunle, Orsat, y Raghavan, 2017](#)). Originalmente se utiliza para la conservación de alimentos, y en la última década se ha aplicado para recuperar compuestos bioactivos, especialmente polifenoles. Aquí se aprovechan las ondas mecánicas, las cuales generan cavitación, un fenómeno en el cual burbujas microscópicas colapsan y crean puntos calientes con alta presión y temperatura. Este colapso asimétrico de las burbujas produce micro-chorros de alta velocidad que mejoran la transferencia de masa y la difusión de las moléculas objetivo desde la matriz hacia el solvente, aumentando significativamente la eficiencia de extracción, de acuerdo con lo reportado por ([Ojha, Aznar, O'Donnell, y Tiwari, 2020](#)) y ([Mariatti, Gunjevič, Boffa y Cravotto, 2021](#)).

Extracción asistida por microondas (EAM)

En esta técnica se usan ondas electromagnéticas para acelerar el proceso de extracción. Estas microondas generan calor, lo que conlleva al aumento de la temperatura de extracción y una mayor velocidad de transferencia de masa. Durante el calentamiento por microondas, se crea presión en la estructura de la matriz de interés, debido a la evaporación de la humedad, lo que aumenta la porosidad y facilita la penetración del solvente de extracción. Este calentamiento directo eleva las temperaturas y presiones locales, mejorando la penetración del solvente en la matriz y promoviendo la transferencia de los componentes objetivo hacia el disolvente, según lo descrito por ([Tambun, Alexander y Ginting, 2021](#)), ([More, Jambrak y Arya, 2022](#)) y ([Wen et al., 2020](#))

Extracción asistida con enzimas (EAE)

Esta técnica adopta un enfoque sostenible al combinar enzimas con la matriz de interés, la cual busca el mejoramiento de la eficiencia general del proceso. Este método se centra en la ruptura de la pared celular de la matriz alimentaria mediante la hidrólisis enzimática, realizada bajo condiciones óptimas de extracción. Esta hidrólisis con enzimas conduce a la liberación de componentes bioactivos. La incorporación de enzimas es esencial para ablandar la estructura de la pared celular de la muestra, lo que facilita la penetración del solvente. Dado que los compuestos bioactivos, como los polifenoles y otros fitoquímicos, se encuentran dentro de las células y son difíciles de extraer, esta técnica favorece la liberación eficaz de estos componentes ([Sridhar et al., 2021](#)).

Extracción con fluidos supercríticos (EFS)

Para llevar a cabo esta técnica, es necesario utilizar un fluido supercrítico, lo cual se logra sometiendo una sustancia a una temperatura y presión por encima de su punto crítico, donde no presenta las propiedades típicas de un líquido o un gas ([Ahangari, King, Ehsani, y Yousefi, 2021](#)). La extracción con fluidos supercríticos, como el dióxido de carbono, ofrece ventajas sobre los métodos convencionales debido a las propiedades fisicoquímicas de los disolventes supercríticos, como su alta difusividad y baja viscosidad.

El dióxido de carbono es preferido por su seguridad ambiental y capacidad de eliminarse fácilmente del extracto ([Da Silva, Rocha-Santos y Duarte, 2016](#)). La densidad del fluido varía con la temperatura, lo que afecta la solubilidad de los compuestos y su rendimiento en la extracción. Las temperaturas típicas están entre 303,15 K y 383,15 K, pero para compuestos bioactivos, se evita exceder los 333,15 K para prevenir la degradación. Para mejorar la solubilidad de compuestos polares, se emplea el etanol como co-solvente en concentraciones bajas, ya que es fácil de eliminar del extracto ([Pico Hernández, Jaimes Estévez, López Giraldo y Murillo Méndez, 2019](#)).

Extracción asistida con líquidos presurizados (ELP)

Este enfoque de extracción se basa en la aplicación de niveles elevados de presión (30 atm – 200 atm) para mantener un solvente en estado líquido a temperaturas superiores a su punto de ebullición normal. Esta mayor presión agiliza el proceso de extracción al acelerar la solubilización del compuesto de interés.

El método de ELP optimiza el uso de solventes al combinar altas presiones y temperaturas, logrando así una extracción más eficiente. Al elevar las temperaturas de extracción, aumenta la capacidad de disolución del compuesto, mejorando su solubilidad y velocidad de transferencia de masa, y reduciendo la viscosidad y tensión superficial de los solventes. Todo esto contribuye a una extracción más rápida y efectiva ([Azmir et al., 2013](#)).

En la [Tabla 6](#) se presentan diferentes estudios, los cuales han explorado la extracción de compuestos de la cáscara de cacao utilizando diferentes métodos y condiciones.

Tabla 6.

Estudios de extracción no convencionales de residuos de cacao.

Referencia	Método de extracción	Principales condiciones de trabajo del estudio
Pavlović, Jakovljević, Molnar y Jokić (2021)	EAU	Se variaron las condiciones de temperatura (40, 60, 80°C), tiempo de extracción (30, 60, 90 minutos), relación entre líquido y sólido (10, 30, 50 mL/g) y potencia del ultrasonido (30, 50, 70 %). El contenido total de fenoles (TPC) más elevado fue de 132,897 mgGAE/g de extracto, con una actividad de eliminación del 86,377.
Panić et al. (2020)	EAU	Se exploró el uso de solventes eutécticos profundos naturales (SEPN) como alternativa de extracción. Los resultados revelaron que el SEPN basado en betaina:glucosa dentro de los solventes eutécticos profundos (SEP) demostró la extracción más eficiente de polifenoles.
Belwal et al. (2022)	EAM	Se realizaron pruebas con cuatro duraciones de extracción diferentes (4, 6, 8 y 10 minutos). Los resultados obtenidos para TPC, TCC, FTIR y LC-MS indicaron que una extracción de 10 minutos mediante extracción asistida por microondas (EAM) fue la opción más favorable.
Mellinas, Jiménez, y Garrigós (2020)	EAM	Se investigó el impacto del pH, tiempo, temperatura y proporción de sólidos a líquidos en el contenido total de ácido urónico, en el contenido total de fenoles (TPC), en la capacidad antioxidante, y finalmente en la eficiencia de extracción. Los parámetros óptimos de la extracción asistida por microondas fueron establecidos en 5 minutos, pH 12, 97 °C y relación S/L de 0,04 g/ml
Pangestu et al. (2020)	EAM	Se utilizó una metodología basada en superficies de respuesta para analizar cómo el pH, la relación líquido-sólido y el tiempo de irradiación afectan la cantidad de pectina extraída. El análisis mostró que reducir la relación líquido-sólido no tuvo un efecto significativo en la cantidad de pectina obtenida. Sin embargo, aumentar la concentración de ácido oxálico (lo que disminuye el pH) y prolongar el tiempo de irradiación incrementaron la cantidad de pectina extraída.
Hennessey-Ramos, Murillo-Arango, Vasco-Correa, y Paz Astudillo (2021)	EAE	Se demostró la viabilidad de utilizar cáscaras de vaina de cacao para extraer pectina mediante enzimas comerciales como <i>Celluclast</i> 1,5 L. El uso de enzimas redujo las temperaturas y la cantidad de ácido necesarios en la extracción, lo que disminuye el impacto ambiental.
Valadez-Carmona et al. (2018)	EFS	Se optimizó la extracción de compuestos fenólicos de la cáscara de vaina de cacao utilizando dióxido de carbono en estado supercrítico (SC-CO ₂). Los parámetros clave evaluados fueron temperatura, presión y co-solvente (etanol). Se encontró que la presión y el porcentaje de etanol fueron determinantes en el rendimiento de extracción con condiciones óptimas de 60 °C, 299 bar y 13,7% de etanol.
Okiyama et al. (2018)	ELP	Se analizó la composición de la cáscara del grano de cacao, específicamente catequina, epicatequina, procianidina B2, cafeína y teobromina. Los resultados destacaron la eficiencia del ELP, donde un aumento en temperatura y tiempo incrementó el rendimiento de extracción de flavanoles. Sin embargo, se observó que tiempos y temperaturas muy altos provocaron degradación de las procianidinas B2.
Mazzutti et al. (2018)	EFS y ELP	Se desarrolló un sistema personalizado que combina dióxido de carbono supercrítico (sc-CO ₂) y extracción líquida presurizada (PLE) con etanol para recuperar compuestos antioxidantes de cáscaras de grano de cacao. Los extractos resultantes mostraron mayor contenido fenólico y actividad antioxidante en comparación con métodos individuales.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados reportados que utilizan diferentes técnicas de extracción no convencional presentan ventajas y desafíos en comparación con los métodos convencionales. Los desafíos incluyen el uso de grandes volúmenes de solventes, riesgos de solventes orgánicos, tiempos prolongados, baja selectividad y rendimientos reducidos. La demanda actual busca enfoques alternativos que superen estos problemas, priorizando métodos no convencionales que acorten los tiempos de extracción, reduzcan el uso de solventes peligrosos y sean más eficientes en términos energéticos y de consumo de agua ([Pagano et al. 2021](#)).

Las técnicas no convencionales de extracción generalmente presentan ventajas como tiempos de extracción más reducidos y una mayor eficiencia en la obtención de compuestos. Esto conlleva a la disminución del consumo de recursos como energía y solventes, resultando en una mayor productividad y una menor huella ambiental en el proceso de extracción. Estos enfoques de extracción verde, al ser más versátiles y selectivos en la recuperación de productos, tienen el potencial de contribuir al desarrollo de una industria más sostenible ([Freitas et al., 2021](#)).

El desarrollo de enfoques de extracción basados en principios ecológicos está ampliando la investigación en este campo. La sustitución de solventes convencionales por alternativas más sostenibles, como solventes eutécticos profundos, líquidos iónicos y tensioactivos no iónicos, se ve como una opción viable para recuperar compuestos naturales y evitar la generación de desechos perjudiciales. Sin embargo, las técnicas de extracción verde enfrentan desafíos propios, como altos costos iniciales, gastos operativos considerables, complejidad en la configuración, capacitación requerida y costos de mantenimiento, lo que limita su aplicación a gran escala ([Picot-Allain, Mahomoodally, Ak y Zengin, 2021](#)).

4. Conclusión

Este estudio demuestra potencial de las tecnologías emergentes de extracción para la valorización de los residuos de cacao, subproductos abundantes de la industria cacaotera. La investigación sistemática y el análisis de la bibliografía científica permitieron identificar y caracterizar los compuestos valiosos presentes en la cáscara de la vaina y del grano de cacao, estableciendo una base sólida para la aplicación de técnicas de extracción no convencionales.

Las tecnologías emergentes, como la extracción asistida por ultrasonido, microondas, enzimas y fluidos supercríticos han demostrado ser eficientes en la recuperación de compuestos bioactivos y pectinas, ofreciendo ventajas como la mejora en la eficiencia, la conservación de compuestos valiosos y la reducción del impacto ambiental.

La valorización de los residuos de cacao no solo contribuye a la economía circular y la sostenibilidad, sino que también abre la puerta a la creación de productos de alto valor añadido. Estos productos, ricos en antioxidantes y nutrientes, pueden ser utilizados como ingredientes funcionales en la industria alimentaria, mejorando el perfil nutricional de diversos alimentos. Además, los extractos de cacao tienen aplicaciones prometedoras en la industria cosmética y farmacéutica, ofreciendo beneficios para la salud de la piel y el desarrollo de nuevos medicamentos.

En conclusión, la innovación tecnológica en la extracción de compuestos de los residuos de cacao representa una oportunidad para transformar subproductos en recursos valiosos, promoviendo prácticas más sostenibles y responsables en la industria. La ejecución de estudios experimentales en este campo, aprovechando residuos de origen agroindustrial con contenido de compuestos bioactivos, que busquen optimizar la extracción basada en técnicas no convencionales, pueden valorizar este tipo de residuos, entre los cuales se encuentran los del cacao.

Sobre los autores

Luisa Fernanda Perea-Salazar

Ingeniera Química, Universidad de Cartagena, Cartagena - Colombia.
lpereas@unicartagena.edu.co <https://orcid.org/0009-0003-2690-2002>

Martha Cuenca-Quicazán

Doctorado en Ingeniería Química, Universidad Nacional de Colombia. Profesora Asociada, Universidad de Cartagena, Cartagena - Colombia.
mcuencaq@unicartagena.edu.co <https://orcid.org/0000-0003-4243-7625>

Alexis López-Padilla

Doctor en Ciencias de la Alimentación, Universidad Autónoma de Madrid, Madrid - España.
alopezp2@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-7668-3704>

Declaración de divulgación

Los autores declaran que no existe ningún potencial conflicto de interés relacionado con el artículo.

Fuentes de financiación

Vicerrectoría de investigaciones de la Universidad de Cartagena, Cartagena - Colombia

Disponibilidad de datos

Los autores declaran que en el artículo se encuentran todos los datos necesarios y suficientes para la comprensión de la investigación.

Contribución de los autores

Luisa Fernanda Perea-Salazar: Realización de búsqueda bibliográfica, organización, filtrado y redacción del primer borrador del artículo.

Martha Maria Cuenca-Quicazan: Dirección del trabajo, revisión de versiones previas, correcciones y soporte técnico.

Alexis López-Padilla: Codirección del trabajo, revisión de versiones previas, correcciones, soporte técnico y tecnológico y asesoría en el uso de herramientas digitales.

Referencias bibliográficas

1. ADETUNJI, Lanrewaju Ridwan; ADEKUNLE, Ademola; ORSAT, Valérie; RAGHAVAN, Vijaya. Advances in the pectin production process using novel extraction techniques: A review. In: Food Hydrocolloids. 2017. vol. 62. p. 239-250. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.08.015>
2. ADI-DAKO, Ofosua; OFORI-KWAKYE, Kwabena; FRIMPONG MANSO, Samuel; BOAKYE-GYASI, Mariam El; SASU, Clement; POBEE, Mike. Physicochemical and Antimicrobial Properties of Cocoa Pod Husk Pectin Intended as a Versatile Pharmaceutical Excipient and Nutraceutical. In: Journal of Pharmaceutics. 2016 vol. 2016, p. e7608693, <https://doi.org/10.1155/2016/7608693>
3. AHANGARI, Hossein; KING, Jerry W.; EHSANI, Ali; YOUSEFI, Mohammad. Supercritical fluid extraction of seed oils – A short review of current trends. In: Trends in Food Science & Technology. 2021. vol. 111, p. 249-260. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.066>
4. ÁLVAREZ, Malena; VERA CHANG, Jaime; IBÁÑEZ, Alejandro. Sistema de producción de la almendra y del cacao: Una caracterización necesaria. En: Revista de Ciencias Sociales. 2021. vol. 27, no. Esp. 3. p. 372-390, <https://www.redalyc.org/journal/280/28068276029/html/>
5. ANTICONA Mayra; BLESÁ Jesús; FRIGOLA Ana; ESTEVE María José. High Biological Value Compounds Extraction from Citrus Waste with Non-Conventional Methods. In: Foods. 2020 Jun 20;vol.9, no. 6. p. 811. <https://doi.org/10.3390/foods9060811>
6. AZMIR, Juliayana; ZAIDUL, I.S.M.; RAHMAN, Md. Mizanur; SHARIF, Khairul M.; MOHAMED, Azrina; SAHENA, Ferdous; JAHURUL, Md. Hasan Al; GHAFOOR, Kashif; NORULAINI, Norulaini A.N.; OMAR, Abdul K.M. Techniques for extraction of bioactive compounds from plant materials: A review. In: Journal of Food Engineering. 2013 vol. 117, no. 4, p. 426-436. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.01.014>.
7. BALENTIĆ, Jelena P.; AČKAR, Đurđa; JOKIĆ, Stela; JOZINOVIĆ, Antun; BABIĆ, Jurislav; MILIČEVIĆ, Boris; ŠUBARIĆ, Drago; PAVLOVIĆ, Neda. Cocoa Shell: A By-Product with Great Potential for Wide Application. In: Molecules. 2018. vol. 23, no. 6, p. 1404. <https://doi.org/10.3390/molecules23061404>
8. BARRIOS-RODRÍGUEZ, Yuleima F.; SALAS-CALDERÓN, Karem T.; OROZCO-BLANCO, Diego A.; GENTILE, Paola; GIRÓN-HERNÁNDEZ, Julián. Cocoa Pod Husk: A High-Pectin Source with Applications in the Food and Biomedical Fields. In: ChemBioEng Reviews. 2022. vol. 9, no. 5. p. 462-474 <https://doi.org/10.1002/cben.202100061>
9. BELWAL, Tribhuwan; CRAVOTTO, Carla; RAMOLA, Sanjay; THAKUR, Manisha; CHEMAT, Farid; CRAVOTTO, Giancarlo. Bioactive Compounds from Cocoa Husk: Extraction, Analysis and Applications in Food Production Chain. In: Foods. 2022. vol. 11, no. 6, p. 798. <https://doi.org/10.3390/foods11060798>
10. CAMPOS-VEGA, Rocío; NIETO-FIGUEROA, Karla H.; OOMAH, B Dave. Cocoa (Theobroma cacao L.) pod husk: Renewable source of bioactive compounds. In: Trends in Food Science & Technology. 2018. vol. 81, p. 172-184. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.09.022>
11. DA SILVA, Rui P. F.F.; ROCHA-SANTOS, Teresa A. P.; DUARTE, Armando C. Supercritical fluid extraction of bioactive compounds. In: TrAC Trends in Analytical Chemistry. 2016. vol. 76, p. 40-51. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2015.11.013>

12. DZELAGHA, Bruno F.; NGWA, Ngwa M.; NDE BUP, Denis N. A Review of Cocoa Drying Technologies and the Effect on Bean Quality Parameters. In: *International Journal of Food Science*. 2020. vol. 2020, p. e8830127 <https://doi.org/10.1155/2020/8830127>
13. FOWLER, M. S.; COUTEL, Françoise. Cocoa beans: from tree to factory. En M. Kutz (Ed.), *Beckett's Industrial Chocolate Manufacture and Use* (p. 9-49). John Wiley & Sons, Ltd., 2017. <https://doi.org/10.1002/9781118923597.ch2>
14. FREITAS, Lucas C.; BARBOSA, José R.; DA COSTA, Ana L. C.; BEZERRA, Francisco W. F.; PINTO, Ricardo H. H.; DE CARVALHO JUNIOR, Raimundo N. From waste to sustainable industry: How can agro-industrial wastes help in the development of new products? In: *Resources, Conservation and Recycling*. 2021. vol. 169, p. 105466. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105466>
15. GANESH, K. S.; SRIDHAR, A.; VISHALI, S. Utilization of fruit and vegetable waste to produce value-added products: Conventional utilization and emerging opportunities-A review. In: *Chemosphere*, vol. 287, no. 3, p. 132221, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132221>
16. GONZÁLEZ, Ximena. Producción de cacao en Colombia creció 8,9% en la vigencia 2021. *Redagráfica*, 11 de febrero de 2022. <https://redagricola.com/produccion-de-cacao-en-colombia-crecio-89-en-2021-hasta-nuevo-record-historico/>
17. GRILLO, G., et al. Cocoa bean shell waste valorisation; extraction from lab to pilot-scale cavitation reactors. In: *Food Research International*. 2019. vol. 115, p. 200-208. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.08.057>
18. GUDA, Prasanna; GADHE, Shruthi. Primary processing of cocoa. In: *International Journal of Agricultural Science and Research*. 2017. vol. 7, no. 2, p. 457-462. <https://journals.indexcopernicus.com/api/file/viewByFileId/152542>
19. GUTIÉRREZ, Tommy J. State-of-the-Art Chocolate Manufacture: A Review: State-of-the-art chocolate manufacture... In: *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, 2017. vol. 16, no.6. p.1313-1344. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12301>
20. HANSEN, Claus L.; CHEONG, David Y. Chapter 26 - Agricultural Waste Management in Food Processing. En M. Kutz (Ed.), *Handbook of Farm, Dairy and Food Machinery Engineering* (Third Edition) (p. 673-716). Academic Press, 2019. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814803-7.00026-9>
21. HENNESSEY-RAMOS, Laura; MURILLO-ARANGO, William; VASCO-CORREA, Juliana; PAZ ASTUDILLO, Isabel C. Enzymatic Extraction and Characterization of Pectin from Cocoa Pod Husks (*Theobroma cacao* L.) Using Celluclast® 1.5 L. In: *Molecules*. 2021. vol. 26, no. 5, p. 1473. <https://doi.org/10.3390/molecules26051473>
22. LANREWAJU, Rasheedat A.; ADEKUNLE, Adeyemi; ORSAT, Valerie; RAGHAVAN, Vijaya. Advances in the pectin production process using novel extraction techniques: A review. In: *Food Hydrocolloids*, 2017. vol. 62, p. 239-250, <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.08.015>
23. LAZARJANI, Mona P.; YOUNG, Owen; KEBEDE, Lensa; SEYFODDIN, Ali. Processing and extraction methods of medicinal cannabis: a narrative review. *Journal of Cannabis Research*. 2021. vol. 3, no. 1, p. 32. <https://doi.org/10.1186/s42238-021-00087-9>
24. LONDOÑO-LARREA, Paola; VILLAMARIN-BARRIGA, Edison; GARCÍA, Ana; MARCILLA, Antonio. Study of Cocoa Pod Husks Thermal Decomposition. In: *Applied Sciences*. 2022. vol. 12, no. 18, p. 9318. <https://doi.org/10.3390/app12189318>
25. LU, Fei; RODRIGUEZ-GARCIA, Jorge; VAN DAMME, Ine; WESTWOOD, Nicholas J.; SHAW, Louise; ROBINSON, James S.; WARREN, Gareth; CHATZIFRAGKOU, Aggeliki; MCQUEEN MASON, Simon; GOMEZ, Luis; FAAS, Laura; et al. Valorisation strategies for cocoa pod husk and its fractions. In: *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*. 2018 vol. 14, p. 80-88. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2018.07.007>
26. MANZANO, Pablo; HERNÁNDEZ, Juan; QUIJANO-AVILÉS, Manuel; BARRAGÁN, Alexis; CHÓEZ-GUARANDA, Ivonne; VITERI, Ricardo; VALLE, Oscar. Polyphenols extracted from *Theobroma cacao* waste and its utility as antioxidant for food-grade vegetal oil. In: *Emirates Journal of Food and Agriculture*. 2017. vol. 29, p. 45-50. <https://doi.org/10.9755/ejfa.2016-04-388>
27. MARIATTI, F.; GUNJEVIĆ, V.; BOFFA, L.; CRAVOTTO, G. Process intensification technologies for the recovery of valuable compounds from cocoa by-products. In: *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. mar. 2021. vol. 68, p. 102601. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102601>
28. MARTÍNEZ-VALVERDE, Isabel; PERIAGO, María Jesús; ROS, Gaspar. Significado nutricional de los compuestos fenólicos de la dieta. En: *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*. 2020. vol. 50, no. 1, p. 5-18. https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0004-06222000000100001
29. MANUELA, Panić; DRAKULA, Saša; CRAVOTTO, Giancarlo; VERPOORTE, Robert; Mirjana, HRUŠKAR; Ivana, RADOJČIĆ REDOVNIKOVIĆ; RADOŠEVIĆ, Kristina. Biological activity and sensory evaluation of cocoa by-products NADES extracts used in food fortification. In: *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2020. vol. 66, 2020, p. 102514. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102514>
30. MAZZUTTI, Sidnei; RODRIGUES, Luciana G. G.; MEZZOMO, Natália; VENTURI, Valfredo; FERREIRA, Sílvia Regina S. Integrated green-based processes using supercritical CO₂ and pressurized ethanol applied to recover antioxidant

- compounds from cocoa (*Theobroma cacao*) bean hulls. In: *Journal of Supercritical Fluids*. 2018. vol. 135, p. 52-59. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2017.12.039>
31. MELLINAS, Ana Cristina; JIMÉNEZ, Ana; GARRIGÓS, María Carmen. Optimization of microwave-assisted extraction of cocoa bean shell waste and evaluation of its antioxidant, physicochemical and functional properties. In: *LWT*, 2020. vol. 127, p. 109361. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109361>
 32. MISAILIDIS, Nikolaos; PETRIDES, Dimitrios. Cocoa Processing – Cost Analysis and Optimization using SuperPro Designer, 2020. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.30969.08803>
 33. MORE, P. R.; JAMBRAK, Anet Režek; ARYA, Suresh S. Green, environment-friendly and sustainable techniques for extraction of food bioactive compounds and waste valorization. In: *Trends in Food Science & Technology*. 2022. vol. 128, p. 296-315. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.08.016>
 34. OJHA, Khem S.; AZNAR, Rosa; O'DONNELL, Christopher; TIWARI, Brijesh K. Ultrasound technology for the extraction of biologically active molecules from plant, animal and marine sources. In: *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2020. vol. 122. p. 115663. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2019.115663>
 35. OKIYAMA, Danielle Cristina Gomes; NAVARRO, Silvia Letícia Barros; RODRIGUES, Carmen Elisabete da Cruz. Cocoa shell and its compounds: Applications in the food industry. In: *Trends in Food Science & Technology*. 2017 vol. 63, p. 103-112. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.03.007>
 36. OKIYAMA, Danielle Cristina Gomes; SOARES, Iara Dias; CUEVAS, Marcos S.; CREVELIN, Eduardo José; MORAES, Luciana Aparecida Barbosa; MELO, Marília P.; OLIVEIRA, Alessandra L.; RODRIGUES, Carmen Elisabete da Cruz. Pressurized liquid extraction of flavanols and alkaloids from cocoa bean shell using ethanol as solvent. *Food Research International*. 2018. vol. 114, p. 20-29. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.07.055>
 37. OSORIO-TOBÓN, Juan Fernando. Recent advances and comparisons of conventional and alternative extraction techniques of phenolic compounds. In: *Journal of Food Science and Technology*. 2020. vol. 57, no. 12, p. 4299-4315, <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04433-2>
 38. OSORIO, Lady Laura Del Rio; FLÓREZ-LÓPEZ, Edwin; GRANDE-TOVAR, Carlos David. "The Potential of Selected Agri-Food Loss and Waste to Contribute to a Circular Economy: Applications in the Food, Cosmetic and Pharmaceutical Industries" In: *Molecules*. 2021, vol. 26, no. 2: 515. <https://doi.org/10.3390/molecules26020515>
 39. ODDOYE, Emmanuel O. K.; AGYENTE-BADU, Charles K. y GYEDU-AKOTO, Emmanuel. Cocoa and Its By-Products: Identification and Utilization. En R. R. Watson, V. R. Preedy, y S. Zibadi (Eds.), *Chocolate in Health and Nutrition*. 2013 p. 23-37. Humana Press. https://doi.org/10.1007/978-1-61779-803-0_3
 40. PAGANO, Ilaria; CAMPONE, Laura; CELANO, Rita; PICCINELLI, Anna Lisa; RASTRELLI, Luigi. Green non-conventional techniques for the extraction of polyphenols from agricultural food by-products: A review. In: *Journal of Chromatography A*. 2021. vol. 1651, p. 462295. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2021.462295>
 41. PANGESTU, Rizky; AMANAH, Siti; JUANSILFERO, Andi B.; YOPI; PERWITASARI, Umi. Response surface methodology for microwave-assisted extraction of pectin from cocoa pod husk (*Theobroma cacao*) mediated by oxalic acid. In: *Journal of Food Measurement and Characterization*. 2020. vol. 14, p. 2126-2133. <https://doi.org/10.1007/s11694-020-00459-4>
 42. PANIĆ, Milica; DRAKULA, Sanja; CRAVOTTO, Giancarlo; VERPOORTE, Rob; HRUŠKAR, Maja; RADOJČIĆ REDOVNIKOVIĆ, Ivana; RADOŠEVIĆ, Kristina. Biological activity and sensory evaluation of cocoa by-products NADES extracts used in food fortification. In: *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2020. vol. 66, p. 102514. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102514>
 43. PÁRAMO, Pablo. Cómo elaborar una Revisión Sistemática, 2020. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.31465.85608>
 44. PAVLOVIĆ, Neda; JOKIĆ, Stela; JAKOVLJEVIĆ, Marija; BLAŽIĆ, Marija; MOLNAR, Maja. Green Extraction Methods for Active Compounds from Food Waste—Cocoa Bean Shell. In: *Foods*. 2020. vol. 9, no. 2, p. 140. <https://doi.org/10.3390/foods9020140>
 45. PAVLOVIĆ, Neda; JAKOVLJEVIĆ, Marija; MOLNAR, Maja; JOKIĆ, Stela. Ultrasound-assisted extraction of active compounds from cocoa bean shell. In: *Food in Health and Disease, scientific-professional journal of nutrition and dietetics*. 2021. vol. 10, no. 2, p. 77-88. <https://hrcak.srce.hr/file/391040>
 46. PICOT-ALLAIN, Cédric; MAHOMOODALLY, Mohammad Fawzi; AK, Gokhan; ZENGİN, Gokhan. Conventional versus green extraction techniques — a comparative perspective. In: *Current Opinion in Food Science*. 2021. vol. 40, p. 144-156. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2021.02.009>
 47. PICO HERNÁNDEZ, Sandra Milena; JAIMES ESTÉVEZ, Jhon; LÓPEZ GIRALDO, Luis Javier. Supercritical extraction of bioactive compounds from Cocoa husk: study of the main parameters. En: *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*. 2019 no. 91, p. 95-105. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.n91a09>
 48. PREDAN, Gabriela Maria I.; LAZĂR, Daniela Anca; LUNGU, Ioan I. 15 - Cocoa Industry—From Plant Cultivation to Cocoa Drinks Production. En A. M. Grumezescu y A. M. Holban (Eds.), *Caffeinated and Cocoa Based Beverages* (p. 489-507). Woodhead Publishing, 2019. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815864-7.00015-5>

49. PROCOLOMBIA. Lo que debe saber para exportar cacao fino de aroma. ProColombia, 28 de marzo de 2016. <https://procolombia.co/actualidad-internacional/agroindustria/lo-que-debe-saber-para-exportar-cacao-fino-de-aroma>.
50. RAMÓN, Carolina; GIL-GARZÓN, Maritza Andrea. Efecto de los parámetros de operación de la extracción asistida por ultrasonido en la obtención de polifenoles de uva: una revisión. En: *Tecnológicas*. 2021. vol. 24, no. 51, p 263-277. <https://doi.org/10.22430/22565337.1822>
51. REBOLLO-HERNANZ, Miguel; CAÑAS, Silvia; TALADRID, Diego; SEGOVIA, Ángela; BARTOLOMÉ, Begoña; AGUILERA, Yolanda; MARTÍN-CABREJAS, María A. Extraction of phenolic compounds from cocoa shell: Modeling using response surface methodology and artificial neural networks. In: *Separation and Purification Technology*. 2021. vol. 270, p. 118779. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.118779>
52. REICHEMBACH, Luis Henrique y PETKOWICZ, Carmen Lúcia de Oliveira. Pectins from alternative sources and uses beyond sweets and jellies: An overview. *Food Hydrocolloids*, vol. 118, p. 106824, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106824>
53. SARAH, Miftahul; HASIBUAN, Iskandar Muda; MISRAN, Edy; MAULINA, Sri. Optimization of Microwave-Assisted Pectin Extraction from Cocoa Pod Husk. In: *Molecules*. 2022. vol. 27, no. 19, p. 6544. <https://doi.org/10.3390/molecules27196544>
54. SOARES, Tiago F.; OLIVEIRA, Maria Beatriz P. P. Cocoa By-Products: Characterization of Bioactive Compounds and Beneficial Health Effects. In: *Molecules*. 2022. vol. 27, no. 5, p. 1625. <https://doi.org/10.3390/molecules27051625>
55. SRIDHAR, Adithya; PONNUCHAMY, Muthamilselvi; KUMAR, Ponnusamy Senthil; KAPOOR, Ashish; VO, Dai-Viet N.; PRABHAKAR, Sivaraman. Techniques and modeling of polyphenol extraction from food: a review. In: *Environmental Chemistry Letters*. 2021. vol. 19, no. 4, p. 3409-3443. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01217-8>
56. STAHEL, Walter R. The circular economy. *Nature*. 2016. vol. 531, no. 7595, p. 435a. <https://doi.org/10.1038/531435a>.
57. TAMBUN, Rina; ALEXANDER, V.; GINTING, Y. Performance comparison of maceration method, soxhletation method, and microwave-assisted extraction in extracting active compoun. 2021. vol. 1122, no. 1, p. 012095. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1122/1/012095>
58. UMAN, Lisa S. Systematic reviews and meta-analyses. In: *Journal of the Canadian Academy of Child and Adolescent Psychiatry*. 2011. vol. 20, no. 1, p. 57-59. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106824>
59. VALADEZ-CARMONA, Leticia; ORTIZ-MORENO, Alejandro; CEBALLOS-REYES, Guadalupe; MENDIOLA, José Antonio; IBÁÑEZ, Elena. Valorization of cacao pod husk through supercritical fluid extraction of phenolic compounds. In: *Journal of Supercritical Fluids*. 2018. vol. 131, p. 99-105. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2017.09.011>
60. VÁSQUEZ, Zulma S.; DE CARVALHO NETO, Daniel P.; PEREIRA, Guilherme V. M.; VANDENBERGHE, Luciana P. S.; DE OLIVEIRA, Paulo Z.; TIBURCIO, Paula B.; ROGEZ, Hervé L. G.; GÔES NETO, Aristóteles; SOCCOL, Carlos R. Biotechnological approaches for cocoa waste management: A review. In: *Waste Management*. 2019. vol. 90, p. 72-83. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.04.030>
61. VENKATANAGARAJU, Eswaraiah; BHARATHI, N.; SINDHUJA, R. H.; CHOWDHURY, R. R.; SREELEKHA, Y. Extraction and purification of pectin from agro-industrial wastes. *Pectins-Extraction, Purification, Characterization and Applications*. 2020. p. 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106824>
62. WEN, Li; ZHANG, Zhen; SUN, Da-Wen; SIVAGNANAM, S. P. y TIWARI, Brijesh K. Combination of emerging technologies for the extraction of bioactive compounds. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2020. vol. 60, no. 11, p. 1826-1841. 2020. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1602823>
63. ZHANG, Qing-Wen; LIN, Li-Gen; YE, Wen-Cai. Techniques for extraction and isolation of natural products: a comprehensive review. *Chinese Medicine*. 2018. vol. 13, no. 1, p. 20. <https://doi.org/10.1186/s13020-018-0177-x>