

LA PALMA DE ACEITE, UNA AGROINDUSTRIA EFICIENTE, SOSTENIBLE Y MUNDIALMENTE COMPETITIVA

PALMAS

Vol. 44 N°. 1

Volumen 44 N°. 1 de 2023 • pp. 1-85 • enero-marzo de 2023 • ISSN digital 2744-8266.

CULTIVO

Documentación de la labor de cosecha en la implementación exitosa del punto óptimo de cosecha en un cultivar híbrido de palma de aceite en la Zona Central

PROCESAMIENTO

Dinámica de la comunidad microbiana y generación de electricidad en CCM inoculadas con lodos POME y cultivo electrogénico puro

VALOR AGREGADO

Hacia el aprovechamiento energético de los raquis de palma en calderas de biomasa

Publicación de la Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite, en circulación desde 1980.

 **fedepalma**
CON EL APOYO DEL FONDO DE FOMENTO PALMERO

Gracias a la oportuna contribución de los palmicultores al **Fondo de Fomento Palmero,**

trabajamos por una
palmicultura colombiana
competitiva y sostenible



La cuenta del Fondo
de Fomento Palmero
es administrada por la
Federación Nacional de
Cultivadores de Palma
de Aceite, Fedepalma



Calle 98 No. 70-91
Tel: (601) 313 86 00
www.fedepalma.org
Bogotá D. C., Colombia

Esta publicación cuenta con el patrocinio
del Fondo de Fomento Palmero



Fotografía: archivo Fedepalma

La revista Palmas no se hace responsable
de las opiniones emitidas por los autores.

Incluida en el portal de revistas de
la BVS de BIREME/OPS/OMS

Versión digital en OJS:
<https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas>

Nicolás Pérez Marulanda
Presidente Ejecutivo de Fedepalma

Editor

Andrés Felipe García Azuero
Director de Planeación Sectorial y Desarrollo Sostenible

Comité Editorial

Andrés Felipe García Azuero
Hernán Mauricio Romero Angulo
Juliana Franco Acevedo

Comité Científico

Álvaro Campo Cabal, Ph.D.
Denis Pedraza, Ing. Mecánico

Coordinación Editorial

Ana Marcela Hernández Calderón

Especialista en Publicaciones

Gabriel Alejandro Molano Rojas

Responsable de Publicaciones

Yolanda Moreno Muñoz

Centro de Información y Documentación

Giovanny E. Cortés

Traductor

Carlos Arenas

Diseño y diagramación

Lida R. Chaparro S.

CONTENIDO

EDITORIAL

- 6 Revista Palmas digital: la apuesta para comunicar los resultados de investigación
Nicolás Pérez Marulanda.

CULTIVO

- 8 Documentación de la labor de cosecha en la implementación exitosa del punto óptimo de cosecha en un cultivar híbrido de palma de aceite en la Zona Central
Documentation of Harvesting Labor for a Successful Implementation of Optimum Harvesting Point in a Hybrid Oil Palm Cultivar in the Central Zone
García Pinilla, Alejandra Milena; Niño Estupiñán, Andrés; Zárate Gómez, Paola; Pulido Álvarez, Néstor Fernando; Mosquera Montoya, Mauricio.
- 19 Caso de adopción del enfoque de agricultura de precisión en la palmicultura colombiana: formularios digitales
Case of Adoption of the Precision Agriculture Approach in Colombian Oil Palm: Digital Forms
Rincón Romero, Víctor; Torres León, Jorge Luis; Ruiz Martínez, José; Zabala Quimbayo, Andrea; Barrera Agudelo, Osmar.

PROCESAMIENTO

- 29 Dinámica de la comunidad microbiana y generación de electricidad en CCM inoculadas con lodos POME y cultivo electrogénico puro
Microbial Community Dynamics and Electricity Generation in MFCs Inoculated with POME Sludges and Pure Electrogenic Culture
Albarracín Arias, Jorge A.; Yu Chang Ping; Toshinari Maeda; Valdivieso Quintero, Wilfredo; Sánchez Torres, Viviana.

■ VALOR AGREGADO

- 51 Hacia el aprovechamiento energético de los raquis de palma en calderas de biomasa
Towards the Energy Utilization of Palm Empty Fruit Bunch in Biomass Boilers
Bayona Roa, Camilo; García Navarro, Juan Guillermo; Gacha, Jeisson; Ricaurte, Héctor.
- 65 Aprovechamiento de la biomasa residual como fuente de energía renovable en Colombia:
escenario de gasificación potencial
*Harnessing Residual Biomass as a Renewable Energy Source in Colombia: A Potential
Gasification Scenario*
Pérez Rodríguez, Claudia Patricia; Ríos, Luis Alberto; Duarte González, Carmen Sofía; Montaña, Andrés;
García Marroquín, Catalina.

■ OTROS

- 83 Publicaciones de Cenipalma en otros medios
Publications by Cenipalma in other Media
Fedepalma.

PALMAS es una publicación de la Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite (Fedepalma) fundada en 1980, de circulación trimestral a nivel nacional e internacional.

PALMAS es una revista de análisis especializada en la agroindustria de la palma de aceite con artículos sobre el desarrollo de nuevas tecnologías para el cultivo, el procesamiento y la extracción de aceite de palma, aspectos nutricionales del consumo de aceites y grasas, análisis de mercados y comercialización, así como el registro de los eventos gremiales de la Federación.

Está dirigida a todo el sector palmicultor, los gerentes, administradores y agrónomos de las plantaciones, a las entidades representativas del sector agropecuario en general, a los diferentes estamentos del gobierno, a las industrias de aceites y grasas, a los alimentos concentrados, a las industrias con aplicaciones no comestibles de los aceites de palma, a los centros educativos y de investigación nacionales e internacionales y al público interesado en el tema. Circula, además, en países de América, Europa y Asia.

Se publican trabajos inéditos, resultados de investigación, artículos preparados con base en tesis de grado, informes o avances técnicos, artículos traducidos de otras publicaciones, ponencias de eventos, artículos de revisión.

Las opiniones expresadas en los artículos reflejan el pensamiento y opinión de los autores y no necesariamente los de Fedepalma.

El Comité Editorial se reserva el derecho de aceptar los artículos que se van a publicar, previa revisión por personal técnico y pares.

Los artículos deben cumplir con las normas editoriales elaboradas por Fedepalma. Todos los artículos serán sometidos a una corrección de estilo realizada por un experto.

Guía para la elaboración de artículos en revista Palmas

Presentación de artículos

- Enviar original por medio del portal OJS (publicaciones.fedepalma.org)
- Documento original en Word, en medio digital, a 12 puntos y doble espacio, con márgenes de 2,5 cm.
- Todos los artículos deben incluir título (no más de 15 palabras) en español y en inglés, sección a la que pertenecen y tipo de artículo.
- Títulos. Primer orden en mayúsculas y negritas; segundo orden: minúsculas y negritas; tercer orden: en cursivas.
- Las tablas y figuras en Excel o programa original. Las fotos en alta resolución (300 dpi o 1 Mega).
- Los artículos deben tener resumen en español y en inglés (250 palabras, cada uno), y palabras clave en los dos idiomas. No debe contener las palabras del título.
- El nombre del autor: dos apellidos, cuando los use, dirección, correo electrónico, cargo y empresa.
- Los artículos de innovación científica y tecnológica tienen un máximo de 25 páginas.
- Los tipos de artículos que tiene la revista son: investigación e innovación científica, reseña, reflexión y traducción.
- Las secciones son: Cultivo, Sostenibilidad, Extensión, Institucionalidad, Emprendimiento, Comercialización y mercados, Valor agregado, Salud y nutrición humana, Memorias de eventos.

La estructura de artículo de investigación e innovación científica y tecnológica es la siguiente:

- Sección y tipo de artículo: enumerados anteriormente.
- Título: en español e inglés, corto (15 palabras máximo), de lo contrario deberá incluirse un subtítulo.
- Autores: escribir el primer nombre e inicial del segundo, primer apellido e inicial del segundo. La dependencia a que pertenecen, dirección postal completa y correo electrónico.
- Resumen en español e inglés: no debe superar las 250 palabras.
- Palabras clave: hasta ocho palabras que faciliten el uso de los sistemas de catalogación y búsqueda de información por computador. No se deben repetir las palabras del título.
- Introducción: se define el problema por estudiar, los objetivos del artículo, la metodología y se indica la importancia de la investigación. Con citas bibliográficas se sustenta la revisión de literatura sobre el tema.
- Materiales y métodos: se deben describir los detalles y características del sitio, materiales, técnicas, diseño experimental y análisis estadísticos.
- Resultados y discusión: es preferible presentarlos unidos. Los resultados deben describirse en forma concisa y utilizar tablas, figuras y fotografías. En la discusión se hará la evaluación de los resultados obtenidos y se relacionan con los resultados de otras investigaciones, sustentados con citas bibliográficas dentro del texto.
- Conclusiones: deben ser breves y corresponden a las recomendaciones, sugerencias e hipótesis nuevas. No debe repetir los resultados.
- Bibliografía: se debe limitar a la estrictamente necesaria y en relación directa con la investigación realizada. Todas las referencias listadas deben estar citadas en el texto. Se deben colocar en orden alfabético por apellido e incluyen: autor, año, título, número de edición, casa editora, lugar de publicación, número de páginas, siguiendo las normas de citación de la American Psychological Association (APA), sexta edición. En caso de ser publicación periódica se debe citar el nombre de la revista y entre paréntesis el país, volumen, número y páginas, si corresponde a una serie o colección.

Advertencia. Los contenidos de los avisos publicitarios de esta revista son atribuibles y responsabilidad exclusiva de los anunciantes o pautantes. Para interponer cualquier reclamación relacionada con los contenidos publicitarios insertados en la revista Palmas, pueden dirigirse a la siguiente dirección de correo electrónico atencionalafiliado@fedepalma.org y desde allí se hará el contacto con el pautante.

Editorial Policy for Palmas Journal

PALMAS is a publication of the National Federation of Oil Palm Growers (Fedepalma) founded in 1980, published quarterly with national and international circulation.

PALMAS is an analysis journal specialized in the oil palm agro-industry, with articles on the development of new technologies for cultivation, processing and extraction of palm oil, nutritional aspects of oils and fats consumption, market analysis and marketing, as well as the record of the trade association events of Fedepalma.

The journal is aimed at the entire oil palm sector, plantation managers, directors, and agronomists, the representative bodies of the agricultural sector in general, the different institutions of the government, the oils and fats industries, animal feed industry, industries with non-edible applications of palm oils, and national and international research and educational centers and public interested in the subject. It also circulates in countries of America, Europe, and Asia.

Unpublished works, research results, articles prepared on the basis of degree thesis, technical reports or advances, articles translated from other publications, papers from events, and review articles are published in this journal.

The opinions expressed in the articles reflect the view and opinion of the authors and not necessarily those of Fedepalma.

The Editorial Committee reserves the right to accept the articles to be published, after review by technical staff or peer review.

The articles must comply with the publishing guidelines established by Fedepalma and submitted to the Office of Publications of Fedepalma in digital form. All articles will be subject to proofreading by an expert.

Note for the Authors: Guidelines for the Preparation of Articles in Palmas

Articles Submission

- Submissions should be process via OJS through publicaciones.fedepalma.org
- Original in Word format 12 points, in digital media, and double space with margins of 2,5 cm.
- The article title should be short, maximum 15 words, in Spanish and English, section and type of article.
- First-order headings must be in upper case and bold; second-order in lower case and bold, and third-order in italics.
- The tables and figures preferably in Excel. High resolution photos (300 dpi or 1 Mega).
- All articles must have a summary in Spanish, and whenever possible in English, and keywords.
- Authors' name must indicate both surnames if used, and data of address, position and company in case of having them.
- Scientific articles should not exceed 25 double-spaced pages.
- The types of articles are: scientific research and innovation, review, reflection and translation.
- The sections are: Culture, Sustainability, Extension, Institutionalality, Entrepreneurship, Marketing and Markets, Added Value, Health and Nutrition

The structure of scientific and technological research and innovation article should be following:

- Title: should be short, maximum 15 words, otherwise a subtitle should be included.
- Authors: place first name and middle initial, first surname and initial of the second; provide organizational affiliation, Email and full postal address.
- Abstract should not exceed 250 words.
- Keywords: up to eight words can be placed to facilitate the use of modern computer-based systems for cataloguing and retrieval of information. The words of the title should not be repeated.
- Introduction: the problem to be studied is defined and the importance of the research is indicated. Literature review on the topic is supported with bibliographic citations.
- Materials and Methods: details and characteristics of site, materials, techniques, experimental design, and statistical analysis should be described
- Results and Discussion: It is preferable to present them together. Results should be described in a concise manner using tables, figures, and photographs. In the discussion, an evaluation of the results obtained will be done and related to other research results, supported with bibliographic citations within the text.
- Conclusions: they should be brief and correspond to the new recommendations, suggestions, and hypotheses. Do not repeat results.
- References: should be limited to the strictly necessary and directly related to the research done. All listed references should be cited in the text. They should be placed in alphabetical order by surname and include: author, year, title, issue number, publishing house, place of publication, page numbers, following the American Psychological Association (APA), sixth edition, referencing and style system. In the event of being a periodical publication, the name of the journal should be cited and in parenthesis the country, volume, number and pages if it corresponds to a series or collection.

Revista Palmas digital: la apuesta para comunicar los resultados de investigación

Atendiendo nuevas realidades y reconociendo que la comunicación eficiente de los resultados de investigación sobre la palma de aceite es un elemento indispensable para transferir conocimiento y ofrecer soluciones a la agroindustria, este año la revista Palmas le apuesta a reforzar la divulgación digital y a una nueva imagen que le permita alcanzar mayor alcance y relevancia.

Respecto a esta edición, la publicación presenta investigaciones que contribuyen al desarrollo de una palmicultura que se apoya en la tecnología, que busca aumentar su producción y que, en el marco de la economía circular, aprovecha el material que sale del procesamiento.

En la búsqueda de incrementar la productividad del cultivo de palma de aceite, se expone un estudio que muestra la implementación a nivel industrial del criterio de cosecha vinculado a las etapas de desarrollo del racimo para extraer mayor cantidad de aceite con los mejores parámetros de calidad. Por otra parte, dada la relevancia del uso de la tecnología en el sector, esta edición incluye diferentes experiencias que reflejan los retos en la adopción del registro digital de datos en campo, historias de héroes anónimos que le apostaron a esta herramienta desde hace algunos años.

En cuanto al procesamiento y valor agregado, la revista Palmas incorpora un artículo sobre la generación de electricidad a partir de agua residual del proceso de extracción de aceite de palma, y otro sobre la investigación que busca superar los problemas tecnológicos para que las calderas generadoras de vapor y electricidad en plantas de beneficio operen quemando raquis. Además, se incluye un estudio que establece el potencial energético de la biomasa residual producida en los procesos agrícolas, agroindustriales y forestales en el país, seleccionando a la gasificación como la tecnología de transformación.

Con esta edición y este contenido damos la bienvenida a un nuevo ciclo digital de la revista Palmas que por más de 40 años ha compartido la información técnica y científica de la palma de aceite.

NICOLÁS PÉREZ MARULANDA
Presidente Ejecutivo de Fedepalma

Digital Revista Palmas: Our Commitment to Share Research Results

In response to new realities and recognizing that the efficient communication of research results on oil palm is critical for transferring knowledge and offering solutions to the agribusiness, this year, Palmas magazine is committed to strengthening digital dissemination and a new image that will increase its reach and relevance.

This issue presents research that contributes to the development of technology-driven palm growing to increase its production and uses processing byproducts within the framework of a circular economy.

Seeking to increase oil palm productivity, we present a study that shows the industrial implementation of harvesting criteria linked to the bunch's development stages to extract the highest amount of oil with the best quality parameters. On the other hand, given the relevance of the use of technology in the sector, this edition includes different experiences that reflect the challenges of adopting digital data recording in the field and stories of unsung heroes who have been implementing this tool for some years.

In terms of processing and added value, Palmas magazine presents a paper on generating electricity from residual water from the palm oil extraction process and another on research that seeks to overcome technological problems so that steam and electricity boilers in mills can operate by burning rachis. It also includes a study that establishes the energy potential of the residual biomass produced in the country's agricultural, agro-industrial and forestry processes, selecting gasification as the transformation technology.

With this issue and its content, we welcome a new digital cycle for Palmas magazine, which has shared technical and scientific information on oil palm for over 40 years.

NICOLÁS PÉREZ MARULANDA
Fedepalma CEO

Documentación de la labor de cosecha en la implementación exitosa del punto óptimo de cosecha en un cultivar híbrido de palma de aceite en la Zona Central*

Documentation of Harvesting Labor for a Successful Implementation of Optimum Harvesting Point in a Hybrid Oil Palm Cultivar in the Central Zone

Este artículo hace parte de los productos de divulgación del proyecto de inversión Investigación en la agroindustria de la palma de aceite del Fondo de Fomento Palmero, administrado por Fedepalma.

<https://doi.org/10.56866/01212923.13989>

CITACIÓN: García-Pinilla, A. M., Niño-Estupiñán, A., Zárate-Gómez, P., Pulido-Álvarez, N. F. & Mosquera-Montoya, M. (2023). Documentación de la labor de cosecha en la implementación exitosa del punto óptimo de cosecha en un cultivar híbrido de palma de aceite en la Zona Central. *Palmas*, 44(1), 8-18.

PALABRAS CLAVE: *Elaeis oleifera* x *Elaeis guineensis*, Productividad laboral, Criterios de cosecha, Escala fenológica.

KEY WORDS: *Elaeis oleifera* x *Elaeis guineensis*, Labor productivity, Harvesting criterion, Phenological scale.

RECIBIDO: enero de 2023.

APROBADO: febrero de 2023.

* Artículo de investigación e innovación científica y tecnológica.

GARCÍA PINILLA, ALEJANDRA MILENA
Auxiliar de Investigación II de
Cenipalma

NIÑO ESTUPIÑÁN, ANDRÉS
Auditor Interno,
Palmas Monterrey S. A.

ZÁRATE GÓMEZ, PAOLA
Extensionista II de Cenipalma

PULIDO ÁLVAREZ, NÉSTOR FERNANDO
Director Agronómico de Palmas
Monterrey S. A.

MOSQUERA-MONTOYA, MAURICIO
Coordinador de la Unidad de
Validación de Cenipalma

Resumen

La cosecha en cultivos de palma de aceite plantados con cultivares *Elaeis oleifera* x *Elaeis guineensis* (OxG) ha sido un desafío para los productores que cambiaron de cultivos de *E. guineensis* al híbrido. Esto se debe a que el criterio utilizado para cosechar racimos de *E. guineensis* (recuento de frutos sueltos) no es aplicable a los cultivares OxG, de hecho, cada cruce OxG muestra diferentes características que indican que los racimos están maduros. En consecuencia,

Cenipalma desarrolló una línea de investigación sobre la adaptación de la escala fenológica BBCH a racimos de palma de aceite de diferentes cruces de OxG. Una escala fenológica BBCH describe las principales características de la inflorescencia femenina en cada etapa de desarrollo, desde las primeras hasta la madurez. Se ha encontrado que un racimo de OxG está maduro en la etapa 807, lo que indica que se puede extraer la mayor cantidad posible de aceite de un racimo con los mejores parámetros de calidad de aceite. El objetivo de esta investigación fue implementar a nivel industrial en Palmas y Extractora Monterrey S. A. el criterio de cosecha vinculado a las etapas de desarrollo del racimo 807 y 809 en Coari x La Mé (cruce OxG). Los resultados indicaron que la cosecha según la escala BBCH para este cruce no altera las cifras de productividad laboral en esta labor. Adicionalmente, la correcta implementación de la escala BBCH se obtuvo a nivel industrial en Palmas y Extractora Monterrey S. A., cuando la mayoría de los racimos fueron cosechados con las siguientes condiciones: 1) al menos 80 % de los frutos de un racimo mostraba opacidad, 2) al menos 51 % de los frutos de un racimo mostraba frutos cuarteados y 3) al menos se veían 4 frutos sueltos.

Abstract

Harvest at oil palm crops planted with OxG cultivars has been challenging for oil palm producers that switched from *E. guineensis* crops to OxG crops. This is because the criterion used to harvest *Elaeis guineensis* bunches (count of loose fruits) is not applicable to OxG cultivars, in fact, each OxG crossing displays different features that indicate that bunches are mature. In consequence, Cenipalma developed a line of research on adapting the BBCH phenological scale to oil palm bunches from different OxG crossings. A BBCH phenological scale describes the main features of the female inflorescence at each developmental stage from early stages to maturity. It has been found that a OxG bunch is mature at stage 807, indicating that at stage 807 one may extract the highest possible amount of oil from a bunch at the best oil quality parameters. The goal of this research was to implement at industrial level in Palmas y Extractora Monterrey S. A. the harvest criterion linked to bunch developmental stages 807 and 809 in Coari x La Mé (OxG crossing). Results indicate that harvest according to the BBCH scale for Coari x La Mé doesn't alter the figures on harvest labor productivity. Additionally, the proper implementation of the BBCH scale was obtained at industrial level in Palmas y Extractora Monterrey S. A. when most bunches were harvested with the following conditions: 1) at least 80% of the fruits from a bunch displaying opacity, 2) at least 51% of the fruits from a bunch displaying fruits with peels cracked and 3) at least four loose fruits.

Introducción

El cultivo de palma de aceite es una actividad agrícola importante para el desarrollo socioeconómico en Colombia. Sus plantaciones cubren 595.723 hectáreas (ha) distribuidas en las 4 zonas palmeras, y su producción en 2021 alcanzó 1,7 millones de toneladas de aceite de palma (Fedepalma, 2020; Fedepalma-Sispa, 2022). Cabe anotar que la siembra de cultivares híbridos OxG en 2021 representó 11,4 % del total de la palma establecida en el país. El incremento en el área sembrada con cultivares OxG es resultado de su resistencia parcial a las enfermedades más limitantes en el desarrollo de cultivos de palma en Colombia: la Pudrición del cogollo (PC) y la Marchitez letal (ML) (Mosque-

ra-Montoya *et al.*, 2021; Navia *et al.*, 2014; Genty y Ujueta, 2013; Pelaez *et al.*, 2010).

Sin embargo, los cultivares OxG han presentado retos para el sector palmicultor debido a las limitaciones en la formación de racimos de fruta fresca (RFF), consecuencia de la baja producción de inflorescencias masculinas, problemas con el llenado y la asincronía floral (Caicedo *et al.*, 2021; Daza *et al.*, 2017; Forero *et al.*, 2012). Por lo anterior, han debido desarrollarse prácticas de manejo como la polinización (asistida o artificial), programas de fertilización y determinación del punto óptimo de cosecha (POC) (el cual difiere entre cultivares OxG). En este documento se hace énfasis en esta última práctica, es

decir, en la determinación del momento de corte de racimos para obtener el mayor contenido de aceite.

Es necesario resaltar que los criterios de corte de racimos en cultivares OxG se estandarizaron con base en la escala BBCH. Esta, describe los estadios de desarrollo y maduración de las inflorescencias femeninas, lo cual permite determinar las características que corresponden al POC. Según esta escala, el momento óptimo de corte de racimos es a partir del estadio 807, pues se estabiliza el número de frutos que aportan aceite, el racimo alcanza su máximo peso y los lípidos se han desarrollado por completo (Forero *et al.*, 2012).

En el caso específico del cultivar híbrido OxG Coari x La Mé, el programa de Biología y Mejoramiento de Cenipalma estableció que los racimos en punto óptimo de maduración (807) se caracterizan por ser de color naranja opaco, y el mesocarpio del fruto es de color naranja, viscoso al tacto y con abundante aceite. Adicionalmente, los racimos que están en este estadio exhiben un desprendimiento natural de entre 3-5 frutos y un porcentaje de cuarteamiento superior a 40 %. El potencial de aceite en este estadio con polinización artificial es de 32,2 % (Romero *et al.*, 2021; Caicedo, *et al.*, 2020; Millán y Romero, 2014).

La cosecha es una de las labores de mayor importancia en el sistema productivo de la palma de aceite. En esta actividad se refleja el resultado de las prácticas agronómicas y de logística de una plantación (Millán y Romero, 2014), de ahí, la importancia de implementar el POC, que aglutina un conjunto de criterios que favorecen el contenido de aceite y la calidad de los RFF que se llevan al proceso de extracción.

En estudios adelantados en 3 de las 4 zonas palmeras de Colombia, la implementación del POC en plantaciones sembradas con cultivares OxG, ha incrementado el contenido de aceite extraído. Hernández *et al.* (2020) evidenciaron en la Zona Oriental un aumento de 5 puntos porcentuales en la tasa de extracción de aceite (TEA) pasando de 18,4 % a 23,4 % para el cultivar Coari x La Mé. Para el mismo cultivar en la Zona Norte (Urabá), Romero *et al.* (2021) reportaron que la adopción del POC incrementó el contenido de aceite de 3,6 puntos porcentuales en la TEA. Finalmente, en la Zona Suroccidental, para el cultivar híbrido Cereté x Deli, Sinisterra *et al.* (2019) y Sinisterra *et al.* (2021) indicaron que la TEA incrementó en 2,6 puntos porcentuales cuando los racimos se cosecharon en estadios fenológicos 807-809.

Pese a todos los esfuerzos realizados por definir las características de los racimos en punto óptimo de cosecha, aún se evidencia en las plantas de beneficio la presencia de racimos cortados en estados inmaduros y sobremaduros. Esto repercute en la cantidad y calidad del aceite extraído, y por ende no se aprovecha al máximo el potencial productivo de los cultivares híbridos. Este trabajo tuvo como objetivo establecer los parámetros que facilitaron la adopción del POC en la plantación Palmas y Extractora Monterrey S. A. para el cultivar Coari x La Mé, es de resaltar que este cruzamiento representa 29 % del total del área sembrada con palmas híbridas en el país.

Metodología

Ubicación

El estudio se desarrolló en Palmas y Extractora Monterrey S. A., empresa ubicada en el municipio de Puerto Wilches (departamento de Santander, Colombia). Allí se evaluó el proceso de corte de racimos implementado según los criterios de cosecha establecidos por Cenipalma para el cultivar Coari x La Mé. Se evaluaron 14 lotes con este cultivar, con palmas sembradas en el periodo 2011 y 2012, correspondientes a 104 hectáreas.

Descripción de la labor de corte de racimos en Palmas y Extractora Monterrey S. A.

El trabajo de investigación se desarrolló durante 52 semanas en las cuales se llevó a cabo la documentación de procesos y se caracterizaron los racimos cosechados con el criterio de POC propuesto por Cenipalma.

Con el fin de describir los procesos asociados al corte de racimos, se sistematizaron las actividades realizadas durante la jornada laboral. Los operarios observados contaban con experiencia y los conocimientos necesarios en la labor de cosecha de RFF. La síntesis de esta descripción es el diagrama de procesos y para su elaboración se utilizaron los símbolos de la Sociedad Estadounidense de Ingenieros Mecánicos (ASME por sus siglas en inglés) (García *et al.*, 2021).

La documentación del proceso se delimitó desde el momento en que el trabajador iniciaba la labor de corte en el lote, hasta cuando entregaba los racimos

en el punto de acopio. La información recolectada tuvo en cuenta las herramientas, el número de integrantes de la cuadrilla y sus actividades, el promedio de número y toneladas de racimos cosechados en una jornada de trabajo.

Caracterización de los racimos cosechados

Para la determinación del punto de maduración se utilizó la escala BBCH desarrollada por Cenipalma establecida para el cultivar Coari x La Mé (Figura 1).

Se evaluó la maduración de los racimos cortados en cuatro calles de cosecha de los lotes en estudio. Posteriormente, en el punto de acopio se evaluó la misma variable, cada tres viajes. Se complementó el análisis

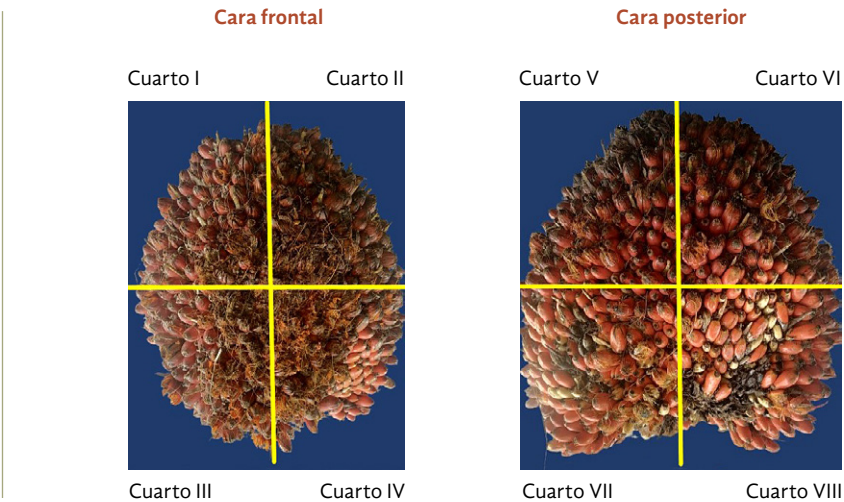
considerando el fruto desprendido naturalmente (criterio de cosecha). En ambos casos (evaluación en lote y evaluación en el punto de acopio) se realizó un muestreo sistemático cada tres racimos, según la recomendación del Área de Biometría de Cenipalma. Las variables contempladas fueron coloración, porcentaje de opacidad, porcentaje de cuarteamiento y número de frutos desprendidos naturalmente.

Para estimar el porcentaje de opacidad y cuarteamiento se utilizó la metodología propuesta por Ruiz-Álvarez *et al.* (2021), la cual sugiere que cada racimo de fruta sea dividido en 8 cuartos (4 en la cara frontal y 4 en la cara posterior) que representan su 100 %. El valor máximo por segmento fue de 12,5 %, la sumatoria del porcentaje asignado correspondió al total del porcentaje de opacidad o cuarteamiento (Figura 2).

Figura 1. Escala fenológica BBCH para híbrido OxG Coari x La Mé, Cenipalma (2022)



Figura 2. Metodología para la estimación del porcentaje de opacidad y cuarteamiento. Adaptado de Ruiz-Álvarez *et al.* (2021)



Resultados y discusión

Por ser una planta de carácter perenne, la palma de aceite continuamente produce hojas y racimos, por lo que es preciso ingresar con intervalos de tiempo definidos para realizar la labor de corte de los mismos (Ruiz-Álvarez *et al.*, 2020). En Palmas y Extractora Monterrey S. A., el ciclo de cosecha se mantuvo en 12 días, lo que implicó que aproximadamente en un año se ingresara al mismo lote 30 veces a cortar los racimos.

Descripción de la labor de corte de racimos en la plantación

Herramientas

La Figura 3 presenta las herramientas y equipos utilizados en la labor de cosecha de racimos, la cual incluye también el corte de las hojas y pedúnculos, y la recolección de racimos en campo.

La herramienta utilizada para el corte de los racimos y de las hojas tiene una altura de 2,5 metros y un peso aproximado de 5 kg. El tubo de extensión es de metal y en la punta se encuentra el palín, este es previamente afilado al inicio de la labor (Figura 3A, 3B).

Los racimos cortados y los frutos desprendidos se disponen en un cajón (zorro) acoplado a un semoviente. Este tiene una capacidad de 800 kg con el fin de evitar la compactación del suelo, ya que, de acuerdo con Mosquera-Montoya *et al.* (2008), el peso de las zorras puede generar este problema dentro de los lotes de palma, y es por eso que es necesario considerar las condiciones del terreno donde se usan y la presión que estas ejercen sobre el mismo (Figura 3C).

El corte del pedúnculo y de las hojas ubicadas en el suelo se realiza con ayuda de un machete previamente afilado, tiene una longitud de 0,45 m y un peso de 0,4 kg.

Diagrama de procesos

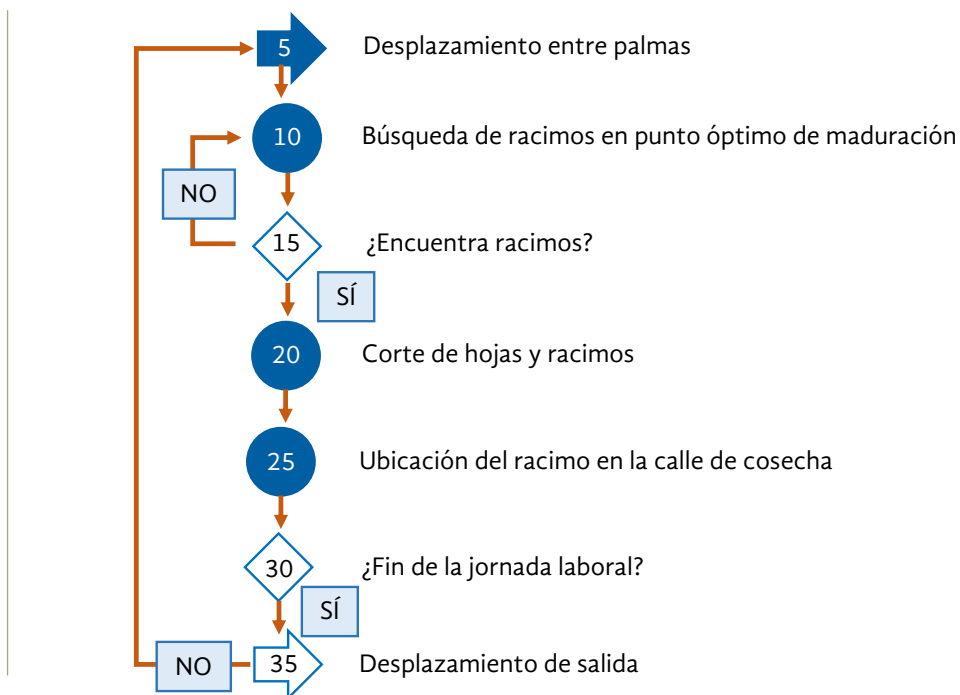
En Palmas y Extractora Monterrey S. A. la cuadrilla de cosecha se conforma con 2 operarios: uno que corta los racimos y otro que corta los pedúnculos, recoge los racimos y apila las hojas. Las Figuras 4 y 5 presentan el diagrama de procesos de la cuadrilla para la labor de cosecha, se resaltan en azul oscuro las actividades que conforman el ciclo básico de la operación. Es decir, aquellas operaciones que se repiten con mayor frecuencia en la ejecución del corte de racimos en punto óptimo de maduración.

El trabajador encargado del corte de los racimos inicia su actividad desplazándose dentro del lote siguiendo una trayectoria en zigzag con el palín al hombro. Una vez llega a la palma, gira en torno a ella buscando en las axilas de las hojas los racimos que se encuentran en punto óptimo de maduración. Si no tiene la certeza del estadio de maduración, lo toca con el palín; si no se desprenden los frutos lo deja en la palma. Además, realiza un corte en la parte apical del racimo y verifica su coloración interna (indicador del estado de maduración). Una vez encuentra el racimo que cumpla con los criterios establecidos en el POC propuesto por Cenipalma (Caicedo *et al.*, 2020), el trabajador ubica su cuerpo en busca de la comodidad para el corte, retira la hoja que lo sostiene y la dispone en el suelo, y seguido corta el racimo. Ubicado el racimo en el suelo, lo pone sobre la calle de cosecha. Continuando su búsqueda de racimos con los criterios del POC.

Figura 3. Herramientas utilizadas en la cosecha de racimos. A. Extensión palín. B. Palín de corte. C. Semoviente



Figura 4. Diagrama de procesos, labor de corte de racimos



Evitar el corte de racimos en estadios inmaduros puede generar disminución en los costos de una tonelada de aceite de 0,10 %, equivalentes a 0,5 dólares por tonelada de aceite producida (Mosquera-Montoya *et al.*, 2008). Adicionalmente, el corte de las hojas y su ubicación en la calle de palera trae beneficios como la disminución de 50 % del costo en la labor de podas programadas y beneficios a nivel agronómico, ya que la ubicación de la hoja preserva la humedad, reduce la erosión del suelo, al descomponerse libera nutrientes, reduce en 10 % la escorrentía superficial y favorece el desarrollo radicular de las palmas (Ruiz-Álvarez *et al.*, 2021; Phoochinda, 2020; Robergen *et al.*, 2020; Tarigan *et al.*, 2016; Ruiz-Álvarez *et al.*, 2015; Jungniyom, 2008) (Figura 4).

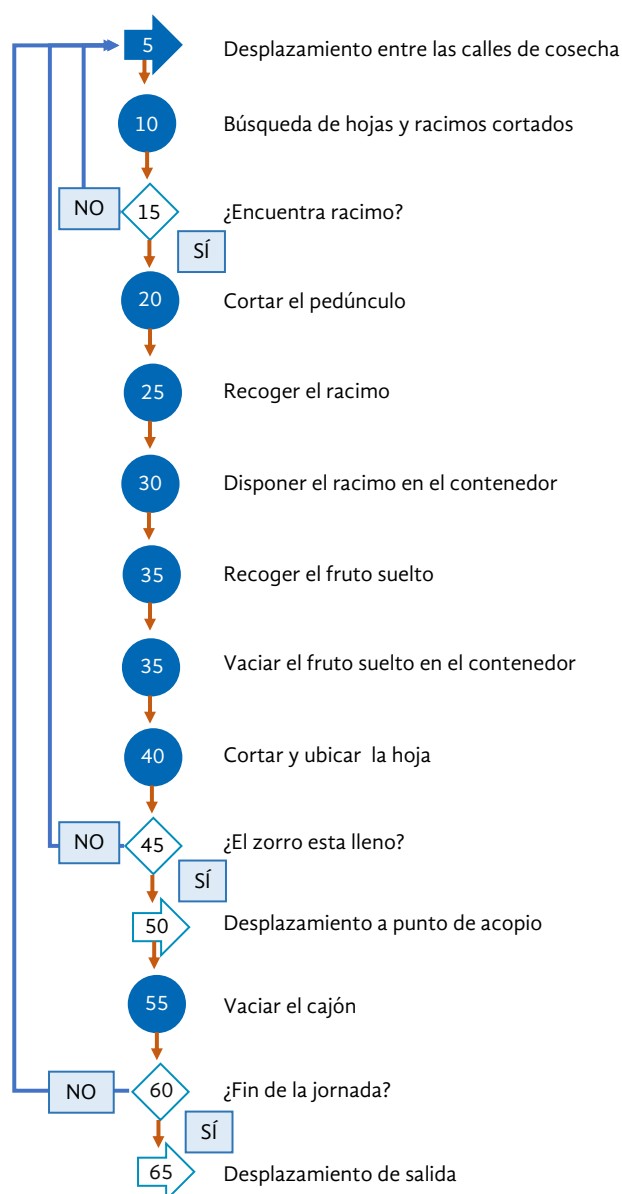
El segundo integrante de la cuadrilla se desplaza entre las calles de cosecha en búsqueda de los racimos y de las hojas cortadas; este operario se ayuda con un búfalo que tira de un zorro que tiene un cajón en el cual se depositan los racimos. En el momento que ubica los racimos y las hojas, con ayuda de un machete retira el pedúnculo del racimo y corta las hojas en dos secciones. Estas las ubica en la calle de palera y los racimos los dispone en el zorro acoplado al búfalo. En un recipiente plástico recoge los frutos que se encuentran en el piso y vacía su contenido en el cajón que contiene los racimos.

Una vez se llena el cajón, el operario se desplaza hacia el punto de acopio. Este cuenta con un sistema de volteo que abre la puerta y el cajón toma una posición de 90 grados desocupándolo en el punto de acopio. Para la identificación de la cosecha, se registra en un formato el lote, el número de cuadrilla y la cantidad de racimos cortados, insumo necesario para la supervisión y el control de los RFF que se envían al proceso de extracción. Finalmente, los racimos son recogidos y transportados hacia la planta de beneficio (Figura 5).

Rendimiento (cantidad de racimos cosechados)

El rendimiento de la cuadrilla encargada de la labor de cosecha de racimos en punto óptimo de maduración fue de 2,6 t de RFF/día en época de baja productividad y 4,3 t RFF/día en época de alta producción, con un peso medio de racimo (PMR) de 13,5 kg. Respecto al número de racimos cortados, se observó que la cuadrilla de trabajo puede cortar y recoger 195 (época de baja producción) y 321 (época de alta producción). En cuanto al rendimiento en área, se estimó que la cuadrilla de cosecha puede recorrer 6,1 ha/día en temporada de baja productividad y 4,2 ha/día en temporada de alta productividad.

Figura 5. Diagrama de procesos, recolector de RFF

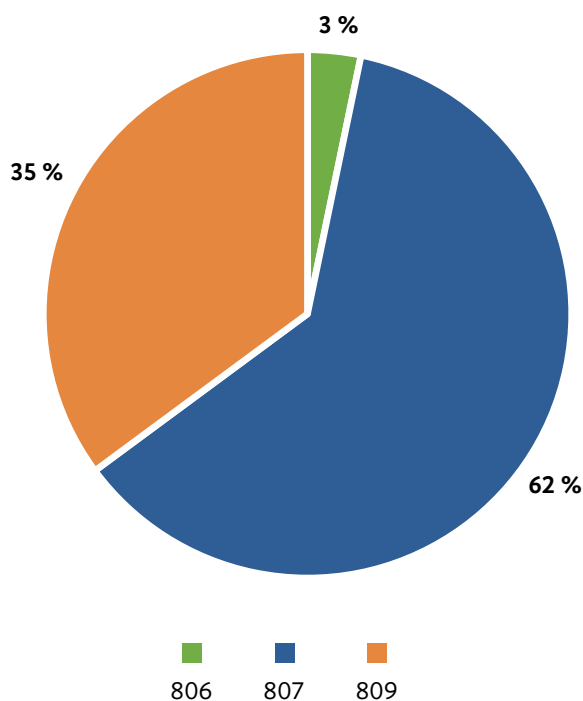


Estos resultados se encuentran entre los rangos mencionados por Ruiz-Álvarez *et al.* (2020), en el cual un trabajador en una jornada puede cortar 291 racimos por día. Asimismo, el rendimiento en toneladas de RFF cosechadas se encuentra en el límite alto del rango reportado por Ruiz-Álvarez *et al.* (2021) para el rendimiento de la labor de corte de racimos, entre 2,0 t RFF-2,7 t RFF. Por su parte, Mosquera-Montoya *et al.* (2008) reportaron un rendimiento de 4,8 a 4,5 ha/día para esta actividad.

Caracterización de los racimos cosechados

En total se evaluaron 2.163 racimos provenientes de palmas híbrido Coari x La Mé. El análisis de las características de los racimos cosechados en Palmas y Extractora Monterrey S. A. durante la fase de estudio arrojó que 97 % se cortaron en estadios maduros (a partir del estadio fenológico 807), momento en el que se alcanza el máximo potencial de aceite. El porcentaje restante corresponde a aquellos racimos en los cuales no es fácil distinguir la coloración como consecuencia del daño de insectos, asincronía floral característica de los cultivares OxG o aquellos racimos que presentan al menos uno de los criterios de corte (Figura 6).

Figura 6. Proporción de racimos cosechados en punto óptimo de cosecha y clasificados por su estadio fenológico



La Tabla 1 presenta las características de los racimos por estadio fenológico. Estos deben cumplir con al menos dos de los criterios de cosecha (desprendimiento, opacidad y cuarteamiento) en cualquier combinación.

Tabla 1. Características de los racimos por estadio fenológico.

Estadio fenológico	Número de frutos desprendidos	Porcentaje de opacidad	Porcentaje de cuarteamiento
806	2	22 %	5
807	4	80 %	51 %
809	9	80 %	75 %

La eficacia de la adopción de esta tecnología por parte de la plantación en estudio, está dada por el esquema de supervisión al cumplimiento de los criterios de corte establecidos. En el caso de Palmas y Extractora Monterrey S. A., esta actividad es ejecutada por los supervisores del área de agronomía y revisiones cruzadas con el personal de la tolva de recepción de la planta de beneficio. Adicionalmente, la capacitación y retroalimentación constante se refleja en el cumplimiento de los criterios de maduración establecidos por la escala BBCH para palmas de cultivar híbrido Coari x La Mé.

Conclusiones

Este estudio documentó los procesos de corte y recolección de racimos en punto de maduración propuesto por Cenipalma en Palmas y Extractora Monterrey S. A., plantación de la Zona Central, que cuenta con lotes de palmas sembrados con el cultivar híbrido Coari x La Mé. Estos resultados brindan información útil para la adopción del punto óptimo de cosecha a nivel comercial, lo que implica criterios de corte acorde con las características de los racimos. Asimismo, las cifras de productividad laboral arro-

jan información para la programación de la logística y el personal requerido para la cosecha.

Los resultados permiten afirmar que en Palmas y Extractora Monterrey S. A. la cosecha de racimos en POC no afectó el rendimiento laboral de los trabajadores de cosecha, aunque se requirieron ajustes en la frecuencia de la actividad (ciclos de cosecha) que ya estaban en práctica cuando se llevó a cabo este estudio. Con base en el análisis de los rendimientos de la implementación de esta tecnología se puede afirmar la viabilidad operativa de adoptar el POC en plantaciones sembradas con palmas OxG.

Adicionalmente, estos resultados permiten a quienes administran los cultivos sembrados con Coari x La Mé tener parámetros para designar y entrenar al personal de cosecha en los criterios que deben tener en cuenta para efectuar el corte de racimos, de tal manera que estos tengan el mayor contenido posible de aceite y que este cumpla con parámetros de calidad exigidos por los compradores.

Estos resultados abren la puerta a investigaciones futuras que consideren no solo los criterios de corte, sino también el efecto sobre el llenado en cuanto a extracción de aceite en laboratorio y planta de beneficio.



El Fondo de Fomento Palmero
contribuye al fortalecimiento
de la agroindustria de la palma
de aceite en Colombia.

Bibliografía

- Caicedo, A., Millán-Orozco, S., Ruiz-Romero, R. & Romero, H. M. (2020). *Criterios de cosecha en cultivares híbrido: características que evalúan el punto óptimo de cosecha en palma de aceite*, segunda versión. Bogotá D. C., Colombia: Corporación Centro de Investigación en Palma de Aceite (Cenipalma).
- Caicedo, A., Bayona, C. & Romero, H. M. (2021). *Comparación del periodo de antesis femenina en inflorescencias sincrónicas y asincrónicas del híbrido interespecífico OxG y su impacto sobre la conformación del racimo*. Póster XVII Reunión Técnica Nacional de Palma de Aceite, Bogotá, Colombia.
- Cenipalma. (2022). Punto óptimo de cosecha para cuatro cultivares híbridos interespecíficos OxG de palma de aceite. Corporación Centro de Investigación en Palma de Aceite (Cenipalma).
- Daza, E., Ruiz-Romero, R. & Romero, H. M. (2017). *Guía de bolsillo: Polinización asistida en el híbrido interespecífico *Elaeis oleifera* x *Elaeis guineensis* (OxG)*. Bogotá D. C., Colombia: Centro de Investigación en Palma de Aceite (Cenipalma).
- Fedepalma & Sispa. (2022). *Áreas en desarrollo y producción*.
- Fedepalma. (2020). *Anuario Estadístico 2020. Principales cifras de la agroindustria de la palma de aceite en Colombia y el mundo*.
- Forero, D., Hormaza, P., Moreno, L. & Ruiz-Romero, R. (2012). *Generalidades sobre la morfología y fenología de la palma de aceite* (150p.). Bogotá D. C., Colombia: Centro de Investigación en Palma de Aceite (Cenipalma).
- García, A., Ibagué, D., Munévar, D., Hernández, J. S. & Mosquera-Montoya, M. (2021a). Polinización artificial: ¿ANA en suspensión líquida o ANA en mezcla sólida? *Palmas*, 41(4), 15-26.
- Genty, P. & Ujueta, M. (2013). *Relatos sobre el híbrido interespecífico de palma de aceite OxG Coari x La Mé: esperanza para el trópico*. Bogotá: Fedepalma.
- Hernández, H., Rodríguez, J., Daza, E., Lemus, L. & Mosquera-Montoya, M. (2020). Punto óptimo de cosecha de racimos para híbridos interespecíficos OxG (Coari x La Mé) asperjados con reguladores de crecimiento. *Boletín El Palmicultor*, 580 (junio), 16-17.
- Jungniyom, T. (2008). Zero-Waste Process in Oil Palm Extraction Industries. *Hatyai J.*, 6(2), 159-164.
- Millán, E. & Romero, H. M. (2014). *Determinación del punto óptimo de cosecha en palma de aceite híbrida (*Elaeis oleifera* x *Elaeis guineensis*) en la Zona Suroccidental palmera de Colombia (Tumaco, Nariño)* (Tesis de grado). Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC).

- Mosquera-Montoya, M. & Fontanilla, C. (2008). *Estudios de cosecha en palma de aceite*. Bogotá: Centro de Investigación en Palma de Aceite (Cenipalma).
- Mosquera-Montoya, M. Ruiz-Álvarez, E. Castro, L. & Munévar, D. (2019). Estimación de costos de producción para productores de palma de aceite que han adoptados buenas prácticas agrícolas. *Palmas*, 40(2), 3-20.
- Mosquera-Montoya, M., Camperos, J., García, A., Sinisterra, K., Munévar, D., Ruiz-Álvarez, E., Mesa-Fuquen, E. & Hernández, D. (2021). *Boletín Técnico No. 39. Tecnologías validadas a escala comercial para el manejo del híbrido interespecífico OxG*.
- Mosquera-Montoya, M., Ruiz-Álvarez, E., Munévar, D., Moreno, L., Estupiñán, M., Silva, A., Guerrero, A., Cala, S. & Sierra, S. (2021). Costos de producción 2020 para empresas *benchmark* de la agroindustria de la palma en Colombia. *Palmas*, 42(4), 8-20.
- Navia, E., Ávila, R., Daza, E., Restrepo, F. & Romero, H. M. (2014). Assessment of Tolerance to Bud Rot in Oil Palm under Field Conditions. *European Journal of Plant Pathology*, 140(4), 711-720.
- Pelaez, E., Ramírez, D. & Cayón, G. (2010). Fisiología comparada de palmas africanas (*Elaeis guineensis* Jacq.), americana (*Elaeis oleifera* HBK Cortés) en Hacienda La Cabaña. *Palmas*, 31(2), 29-38.
- Phoochinda, W. (2020). Assessment of Social Return on Investment from the Utilisation of Oil Palm's Residues. *Journal of Oil Palm Research*, 32(1), 145-151.
- Rhebergen, T., Zingore, S., Giller, K., Frimpong, C., Acheampong, K., Tetteh, F., Kofi, E., Zutah, V., Fairhurst, T. (2020). Closing Yield Gaps in Oil Palm Production Systems in Ghana Through Best Management Practices. *European Journal of Agronomy*, 115.
- Romero, H. M., Daza, E., Ayala-Díaz, I. & Ruiz-Romero, R. (2021). High-Oleic Palm Oil (HOPO) Production from Parthenocarpic Fruits in Oil Palm Interspecific Hybrids Using Naphthalene Acetic Acid. *Agronomy*, 11, 290.
- Ruiz-Álvarez, E., Mesa-Fuquen, E., Mosquera-Montoya, M., Beltrán, J. & Guerrero, J. (2015). Ubicación de hojas cortadas durante la poda y la cosecha alrededor de las palmas como *mulch*: estudio de la adopción de la práctica en cultivadores de palma de aceite en Tibú, Norte de Santander. *Palmas*, 36(3), 11-23.
- Ruiz-Álvarez, E., Banguera, J., Pérez, W., Hernández, J., Arévalo, J. & Mosquera-Montoya, M. (2020). Technical and Economic Assessment of Two Harvesting Tools for Young *Elaeis oleifera* x *E. guineensis* Oil Palms. *Agronomía Colombiana*, 38(3), 418-428.
- Ruiz-Álvarez, E., Mosquera-Montoya, M., Munévar, D., Sinisterra, K., López, D., Franco, L., Hoyos, W., Mesa-Fuquen, E., Bernal, I., Sibaja, P., Banguera, J., Bolívar, A., López, J., Mejía, Y., Santacruz, L., Aguiar, C., Rosero, G., Torrecilla, E., Jiménez, W., Pulido, N. & Rojas, L. (2021). Referenciación competitiva al proceso de polinización artificial en cultivares híbridos interespecíficos OxG: Coari x La Mé. *Boletín Técnico No. 40*.

- Sinisterra, K., Caicedo, A., Castilla, C., Ceballos, D., Palacio, M., Cortés, I., Camperos, J. E., Ayala-Díaz, I. & Mosquera-Montoya, M. (2019). Validación del punto óptimo de cosecha en el cultivar híbrido interespecífico OxG Corpoica (Cereté x Deli y Cereté x Yangambi). *Ceniavance* No. 189.
- Sinisterra, K., Camperos, J., Cortés, I., Caicedo, A., Castilla, C. & Ceballos, D. (2021). Validación a escala comercial del punto óptimo de cosecha para el cultivar híbrido interespecífico OxG Cereté x Deli. *Palmas*, 42(3), 15-23.
- Tarigan, S. D., Sunarti, Wiegand, K., Disclich, C., Bejo, S., Heinonen, J. & Meyer, K. (2016). Mitigation Options for Improving the Ecosystem Function of Water Flow Regulation in Watershed with Rapid Expansion of Oil Palm Plantations. *Sustainability of Water Quality and Ecology*, 8, 4-13.

Caso de adopción del enfoque de agricultura de precisión en la palmicultura colombiana: formularios digitales*

Case of Adoption of the Precision Agriculture Approach in Colombian Oil Palm: Digital Forms

<https://doi.org/10.56866/01212923.13735>

CITACIÓN: Rincón-Romero, V., Torres-León, J. L., Ruiz-Martínez, J., Zabala-Quimbayo, A. & Barrera Agudelo, O. (2022). Caso de adopción del enfoque de agricultura de precisión en la palmicultura colombiana: formularios digitales. *Palmas*, 44(1), 19-28.

PALABRAS CLAVE: Recolección móvil de datos, Agricultura de precisión, Tecnología digital.

KEYWORDS: Mobile data collection, Precision agriculture, Digital technology.

* Artículo de reflexión no derivado de investigación.

RECIBIDO: mayo de 2022.

APROBADO: diciembre de 2022.

RINCÓN-ROMERO, VÍCTOR

Investigador Asociado de Cenipalma
vrincon@cenipalma.org

TORRES-LEÓN, JORGE LUIS

Líder Área Geomática de Cenipalma
jltorres@cenipalma.org

RUÍZ MARTÍNEZ, JOSÉ

Especialista en Servicios Edáficos de
Cenipalma
jeruiz@cenipalma.org

ZABALA-QUIMBAYO, ANDREA

Auxiliar de Investigación Geomática
de Cenipalma
azabalaq@cenipalma.org

BARRERA AGUDELO, OSMAR

Especialista en Aplicaciones
Geoinformáticas de Cenipalma
obarrera@cenipalma.org

Resumen

En el presente documento se consignan las experiencias más relevantes del proceso de adopción del registro digital de datos en campo para el cultivo de palma de aceite. Se reconocen actores, etapas, éxitos y fracasos, que en su conjunto construyen el estado actual y las perspectivas de uso de una tecnología que ha permeado los diferentes ámbitos del manejo agronómico y es uno de los hitos de la adopción del enfoque de agricultura de precisión: CyberTracker, formularios digitales hechos a la medida para la palmicultura colombiana.

Abstract

This document contains the most relevant experiences of the process of adopting the digital registration of data in the field for the oil palm crop. Actors, stages, successes and failures are recognized, which together build the current status and prospects for the use of a technology that has permeated the different areas of agronomic management and is one of the milestones in the adoption of the precision agriculture approach: CyberTracker, digital forms made to measure for the Colombian palm industry.

El inicio

“El dedo índice de un trabajador de campo es dos veces el mío”, era la referencia que hacía un palmicultor en 2009 para indicar lo poco viable que consideraba que este utilizara los entonces denominados Asistentes Personales Digitales (PDA por sus siglas en inglés) para registrar datos en una pantalla del tamaño de la palma de la mano. La idea que se planteaba era dejar de lado el registro de datos en planillas de papel y que todo lo que se documentara en campo fuera con PDA. Las ventajas estaban sustentadas en la “oportunidad” de la información, pues se argumentaba que el mismo día el tomador de decisiones tendría los datos disponibles para procesarlos sin esperar una semana hasta que fueran digitados. Sin embargo, la contraparte, además del costo de las PDA en ese momento, se encontraba en la baja adopción de tecnologías digitales por gran parte de la población en Colombia. Solo en el imaginario de pocos cabía la idea de que dispositivos digitales para el registro de datos serían una herramienta más del trabajador en el campo.

Los pioneros

Previo a 2008, en el ámbito de los comités agronómicos de las zonas palmeras se conocían dos iniciativas sobre el registro digital de datos del cultivo, por una parte, la plantación Indupalma Ltda. (San Alberto, Cesar), que utilizó dispositivos denominados “Terminales de colecta de datos” (Mobile Data Terminal, MDT), con dimensiones aproximadas de 10 x 25 cm; implementó un sistema completo de registro y transferencia de datos. No obstante, por el tamaño y costo de los dispositivos, estos eran utilizados por los supervisores, quienes cumplían la función de transcribir la información recolectada por los operarios. Una

apuesta más arriesgada la hizo la plantación Palmas Oleaginosas Bucarelia S. A. S. (Puerto Wilches, Santander), que contrató el desarrollo de formularios digitales que fueron instalados en dispositivos *Pocket PC* de la marca *Hewlett-Packard* (del tamaño de un *smartphone* actual y a un cuarto del precio de los utilizados por Indupalma Ltda.). Estos dispositivos sí eran utilizados por operarios de campo y fue la primera experiencia documentada de registro digital de datos de campo en el cultivo de palma de aceite para Colombia (Figura 1).

En esos años era común encontrar en el escritorio del señor Díaz (Ingeniero de Sistemas de Palmas Oleaginosas Bucarelia S. A. S.) un arsenal de conectores de *Pocket PC* para descargar los datos. Pese a ser un gran avance en el manejo de información, ya que estaba validado en una plantación de más de 2.000 ha, la iniciativa lamentablemente empezó a decaer debido, por una parte, a que la empresa que realizó el desarrollo de los formularios no brindó más soporte y, por otra, la epidemia de la Pudrición del cogollo (PC) en Puerto Wilches acabó con cultivos, trabajos y tecnologías que se habían implementado en las plantaciones de la zona.

Figura 1. Operario de campo de Palmas Oleaginosas Bucarelia S. A. S. al realizar el registro de datos con PDA. Foto: Leonardo Araque



Para la misma época, se consolidaba en Cenipalma un área de trabajo denominada Agricultura de Precisión, y sobre el equipo de investigadores de esta área recayó la responsabilidad de retomar lo que se había hecho en Palmas Oleaginosas Bucarelia S. A. S. Fue así como los investigadores Araque y Forero (2009) en sus pesquisas encontraron el *software*, que sin saberlo, marcaría el rumbo para la adopción del registro digital de datos en el cultivo.

Formularios digitales para todo el mundo

Luego de una ardua labor de búsqueda, se encontró a CyberTracker, *software* que permitía elaborar formularios digitales sin mayor conocimiento sobre programación, compatibles con los dos sistemas operativos más populares del momento: *Windows Mobile* y *Palm OS* (Ansell y Koenig, 2011). Se podían instalar en los PDA y luego de que los datos eran digitados en estos, se descargaban mediante un cable, para recibirlos tabulados. El *software* también permitía adquirir las coordenadas del lugar donde se hacía el registro, novedad que para la época era muy llamativa, sin embargo, se requería adicionalmente comprar un GPS que se conectara a los PDA, razón por la cual esta funcionalidad no fue explorada, pues se consideraba que era suficiente la inversión hecha en los Asistentes Personales, y el GPS no brindaba mayor beneficio pues los datos ya estaban tabulados.

CyberTracker era un *software* desarrollado en Sudáfrica para llevar a cabo el *Tracking* (rastreo) gratuito de fauna salvaje y brindaba un nivel de actualización de versiones constante, equivalente a una “App con 4.5” de esta época. Para 2009 había dos marcas de PDA que manejaban el mercado de estos dispositivos en Colombia, Hewlett-Packard y Palm, la primera con sistema operativo *Windows Mobile* y la segunda con *Palm OS*. Esta última ofrecía el modelo Z22 de un tamaño no superior a cuatro pulgadas y el precio más económico del mercado, el cual fue adquirido para iniciar las pruebas con este tipo de dispositivos en el Campo Experimental Palmar de la Vizcaína (CEPV) en Barrancabermeja, Santander.

Era toda una novedad, lo que para la época aún se consideraba una herramienta sofisticada propia de ejecutivos de las grandes ciudades, ahora estaba siendo utilizado por personas en el campo no para tener estatus social, sino para mejorar la trazabilidad

del cultivo. Lo curioso fue que la confianza en estos minúsculos dispositivos era baja así que, durante el periodo de prueba, los trabajadores lo portaban junto con una planilla de papel en la que de manera paralela registraban el dato.

Contando con los equipos, el investigador Araque diseñó formularios para el registro de plagas y enfermedades, actividades que generaban alto volumen de datos y, por lo tanto, eran las más prometedoras para ponerlos a prueba. Los formularios se diseñaron teniendo en cuenta una consulta realizada con las grandes plantaciones de Zona Central, con el objetivo de crear un formato estándar que cualquier plantación pudiese descargar e instalar en sus dispositivos digitales, con lo cual se le quitaba la carga de tener que aprender a manipular el *software* y se podía implementar casi inmediatamente.

Las fallas con la Palm Z22 no se hicieron esperar, finalmente era un dispositivo para las limpias y delicadas labores de oficina en las grandes ciudades. Sin embargo, de 12 dispositivos que se adquirieron solo 3 sucumbieron, 2 a la alta humedad y temperatura del clima de Barrancabermeja y 1 al alto volumen de agua que transportaban los canales de drenaje. Por lo demás, la prueba fue satisfactoria y se completaron 6 meses de registro digital de datos, con algunas demoras en la descarga del dispositivo al computador, pero para la época los usuarios de *Windows XP* estaban acostumbrados a esperar en estos procesos.

Dada la experiencia y los dispositivos con los que contaba Palmas Oleaginosas Bucarelia S. A. S., se realizó un acercamiento para llevar a cabo una prueba semicomercial en la cual se comparaban los formularios digitales diseñados con CyberTracker y el *software* con que contaba la plantación. Era una jugada arriesgada, pues se iba a poner a prueba una tecnología que solo contaba con seis meses en el cultivo, contra otra que ya llevaba un par de años en funcionamiento, y había sido desarrollada a la medida de lo que se requería en la plantación. Adicional, era someterla al juicio del señor Barrera (Director Agrónomo de la plantación), quien además de ser un líder en los cultivos de la zona, se conocía por su visión pragmática y crítica de las tecnologías. Los resultados con los formularios digitales funcionando en las *Pocket PC* de Palmas Oleaginosas Bucarelia S. A. S. fueron satisfactorios y dejaron en evidencia que el *software* que la empresa había desarrollado requería de la modificación en sus formularios, lo cual no era

posible debido a que el proveedor que hizo el desarrollo ya no existía.

La opción que quedaba era utilizar la facilidad de CyberTracker para modificar los formularios de acuerdo con las necesidades de la plantación, sin embargo, eso iba en contravía de la estandarización que se estaba buscando de los mismos, y adicional requería el diseño y ejecución de un plan de capacitación en formularios que no estaba considerado. Luego, se empezaron a incrementar los casos de PC en las plantaciones de Puerto Wilches, y la discusión sobre la importancia de estandarizar los formularios digitales pasó a segundo plano ante la crisis socioeconómica que se avecinaba en la zona, así que no se habló más de ello.

Formulario digital a la medida

Durante 2010 se continuó con la implementación de los formularios digitales para plagas y enfermedades en el CEPV, los dispositivos Palm Z22 mostraban la inclemencia del uso en campo, pero aún funcionales eran la evidencia de que era posible utilizar este tipo de formularios en esas condiciones y, adicionalmente, en lo que respectaba al CEPV se sentía la confianza en la tecnología, y los formularios de papel eran cosa del pasado. Por otra parte, en 2011 las plantaciones de Puerto Wilches se debatían entre mitigar el avance de la PC y la renovación de los cultivos devastados por la enfermedad; estas renovaciones requerían un manejo más minucioso y la trazabilidad a nivel fitosanitario cobraba importancia debido a la experiencia con la PC, el objetivo era contar con datos de manera oportuna para evitar tomar acciones cuando el problema fuera inmanejable.

De esta manera volvieron a la escena los formularios digitales, pero esta ya no era una tecnología en prueba, se contaba con la experiencia de más de un año en la administración de sus datos, incluyendo la manipulación del programa y todas sus funcionalidades. Lo que no estaba en discusión por parte de las plantaciones era usar formularios estandarizados, si bien, el núcleo de la información fitosanitaria era único al ser un mismo cultivo en la misma zona, los datos administrativos tenían una alta variación, por ejemplo, la nomenclatura de lotes y la identificación de trabajadores.

Adicionalmente, en algunos cultivos se integraban el registro de plagas y enfermedades en una sola

labor, mientras en otras se manejaba de manera separada. Al final, el debate por la estandarización de formularios era perdido (no importaba que eso facilitara la integración de datos a nivel regional), pues en una balanza interesaba más masificar el uso de formularios digitales, ya que garantizaría la oportunidad de la información para la toma de decisiones. Entonces, esa integración regional tendría que ser abordada por los expertos en análisis de datos.

La primera capacitación sobre formularios digitales con CyberTracker fue llevada a cabo en el auditorio de Palmas Oleaginosas Bucarelia S. A. S, la temperatura casi polar del recinto era altamente contrastante con los 38 °C en el exterior, pero eso no impidió que los asistentes de las empresas como Oleaginosas Las Brisas S. A., Palmeras de Puerto Wilches S. A., Palmas Monterrey S. A. y de la misma Bucarelia, estuvieran prestos a adquirir conocimientos que les permitieran implementar dicha tecnología en sus plantaciones. Ha sido una de las capacitaciones más largas sobre el tema y pese a todos los inconvenientes que se presentaron, debido principalmente a la falta de experiencia en ese tipo de formación, los asistentes se llevaron una alta expectativa y, en poco menos de dos meses, cada empresa contaba con sus propios formularios y dispositivos digitales registrando datos en campo.

En 2011, a más de 800 km de Puerto Wilches, en la plantación Astorga (Tumaco), a solicitud de la plantación se inició una prueba de implementación de formularios digitales, la variante aquí eran los dispositivos, y de manera modesta se empezaba a escuchar la palabra *smartphone*. Así que la plantación en pleno furor de los BlackBerry había adquirido cerca de una docena de equipos de marca HTC, unos teléfonos celulares con sistema operativo Windows Mobile y con un teclado incorporado. Esto último era una novedad y se consideraba una ventaja para el ingreso de datos, ya que la pantalla resistiva que utilizaban los PDA de bajo costo de la época generaba inconvenientes a la hora de digitar los datos en campo.

El cambio tecnológico y cultural

Como dicen los abuelos: “las cosas suceden, cuando tienen que suceder”, uno de los mayores inconvenientes para masificar el registro con formularios digitales era el costo de los dispositivos, no obstante, varias plantaciones habían hecho la inversión en PDA, y la palabra CyberTracker ya empezaba a formar parte de las con-

versiones sobre las innovaciones en las plantaciones. Para 2012, se podía conseguir *smartphones* con sistema operativo Android a un costo inferior que las PDA en el mercado y el 14 de enero de 2013 CyberTracker lanzó en su versión 3.294 el soporte para dispositivos Android. En la Figura 2 se presentan algunos de los dispositivos utilizados durante el proceso de adopción de registros digitales desde las PDA hasta los *smartphones*.

Estos factores permitieron promover la tecnología bajo las siguientes banderas: creación de formu-

larios digitales personalizados en *software* gratuito, descarga de datos en hojas de cálculo, en dispositivos de bajo costo tipo *smartphone* y, lo mejor de todo, sin costos adicionales como el plan de datos.

De manera rápida se implementó un plan de capacitaciones que se materializó con una guía (Figura 3), inicialmente en formato digital, en la cual paso a paso se orientaba la creación de un formulario digital, la instalación en un dispositivo con sistema operativo Android y descarga posterior de datos (Rincón *et al.*, 2015).

Figura 2. Breve historia de los dispositivos utilizados en el registro digital en la palmicultura colombiana. De izquierda a derecha: Palm Z22, sistema operativo OS; Celular HCT, sistema operativo Windows Mobile; y *smartphone* Huawei G510, sistema operativo Android



Figura 3. Portada de la guía para la elaboración de formularios móviles, impresa en 2013



Eran los *smartphones* de bajo costo, los que, además de dar el acceso a la telefonía celular para la mayoría de población, brindaban el escenario perfecto para que las plantaciones pudiesen incorporar en sus presupuestos la “herramienta de registro de datos”. Y es que en los proyectos de implementación que se llevaron a cabo en las plantaciones fue necesaria la creatividad para nombrar los dispositivos *smartphone* en los presupuestos, con el fin de que no se pensara que se quería montar una central telefónica o como se conocía coloquialmente una “venta de minutos”. Uno de los nombres más populares fue: DispositivoDigitalParaElRegistroDeDatosConSistemaOperativoAndroid”.

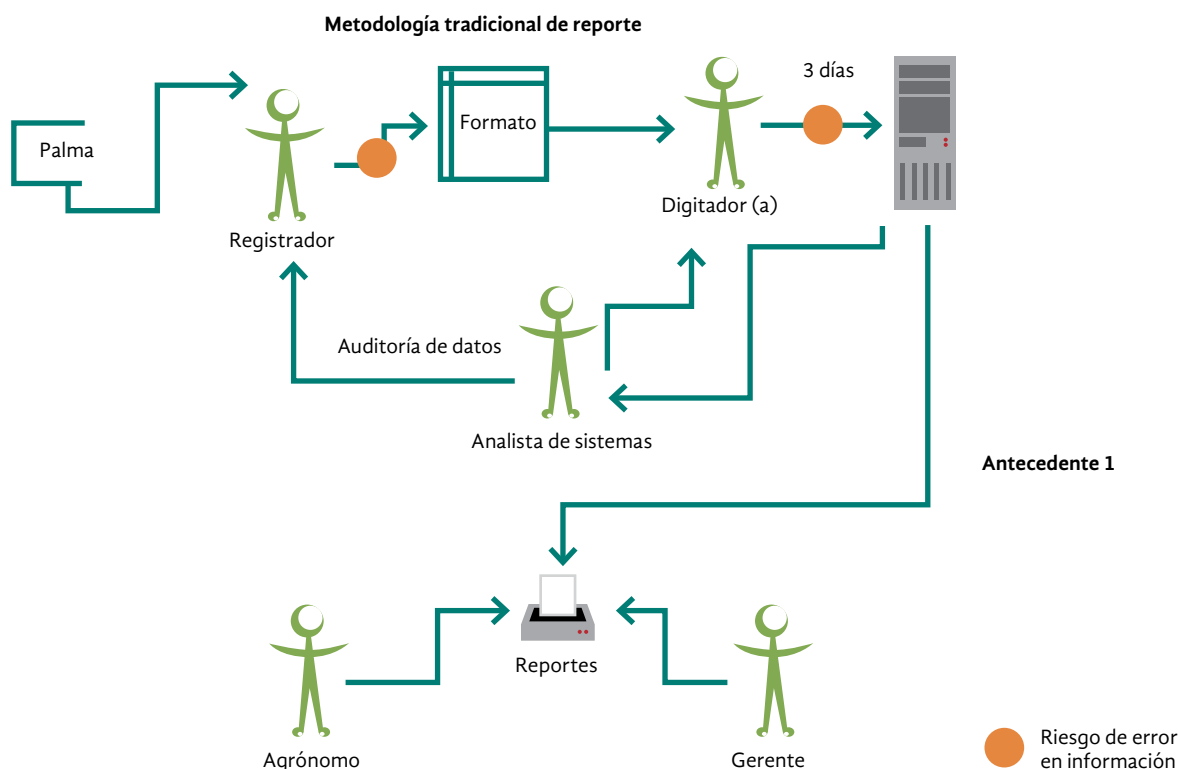
Por lo tanto, el cambio no era solamente tecnológico, era necesario un cambio cultural. Aún era común que la tecnología se percibiera como un juego y los dispositivos como los juguetes que se entregaban al personal en campo.

Pero estos conceptos fueron cambiando, por ejemplo, la plantación Astorga (Tumaco, Nariño) encontró la necesidad de digitalizar el registro de datos de polinización; ya que era evidente el re-

traso en tener la información disponible y en algunos casos se presentaba pérdida de datos; pues había dispuesto más de 30 dispositivos para el uso en dicha labor. Fue así como se pasó del popular escapulario¹, en donde se tenía el total de inflorescencias polinizadas en el día, a un registro de inflorescencias polinizadas para cada palma en el día. Ciro (2014), de la plantación Agricolombia S. A. S. (San Pablo, Bolívar), vio el potencial en el manejo del registro de labores ejecutadas, pues este incidía directamente en el pago a los trabajadores, ya que era común que próximo a las fechas en las que se entregaba el sueldo, el trabajo administrativo se incrementaba porque los registros de las labores se llevaban en planillas de papel que solo se digitaban a último momento, lo cual repercutía algunas veces en inexactitudes y demoras en el pago (ver flujo convencional en Figura 4). De esta manera adaptó

- 1 Grupo de esferas atravesadas por un lazo con el cual los polinizadores llevan el conteo de la cantidad de inflorescencias polinizadas.

Figura 4. Modelo tradicional del flujo de datos en el reporte de labores en Agricolombia S. A. S. Tomado de Ciro y Rincón (2014)



el registro digital de datos para que los supervisores llevaran a campo los dispositivos y registraran las ejecuciones de labores en el momento en que se realizaba su supervisión.

A estas 2 iniciativas se unieron otras plantaciones que implementaron el registro digital como una práctica cotidiana y necesaria en todas las labores de campo en que se llevaba a cabo la gestión de datos. Para 2014 se estimaba que la tecnología se encontraba implementada en plantaciones que sumaban más de 30.000 ha.

Un accidente científico

Retomando el caso de Astorga, en donde se empezó a manejar un volumen de datos diarios importante, en uno de los “desayunos con rendición de cuentas” de Julio Avendaño, Director Agronómico de la plantación, surgió la necesidad de encontrar mayor beneficio de dicha información. Fue así como se llegó a una funcionalidad del CyberTracker que había sido ignorada debido al impedimento de costos que se tenía con los PDA, este fue el GPS. Los *smartphones*, aun los más económicos, tenían un chip GPS que permitía incorporar este registro. Entonces se encontró que con el uso de formularios digitales, además de brindar la hora exacta en donde se hacía el registro, se podía conocer la localización, lo que aportaba más información sobre la calidad de los datos tomados en campo.

Como si existiera una comunicación interna entre zonas palmeras, en una charla con agrónomos en Yarima (San Vicente de Chucurí, Santander), Didier Ibagué, bajo el mismo argumento de Julio Avendaño, planteó la necesidad de visualizar el recorrido del trabajador en el campo aun en la ausencia de registro. Bastó con una sencilla configuración en el formulario para guardar la posición del registro y, adicional, el recorrido durante la labor. En la búsqueda de una tecnología que mejorara la oportunidad de la información para la toma de decisiones en el cultivo, se encontró que a través de la exploración de los datos geográficos se podían complementar los procesos de supervisión y la trazabilidad misma de las labores.

La adopción

La estrategia Productor a Productor, impulsada por el área de Extensión de Cenipalma para maximizar

la adopción de las tecnologías en el cultivo (Beltrán *et al.*, 2015) fue el pilar sobre el que se cimentó la adopción de la tecnología de registro digital de datos. No fue con el ejemplo del investigador o el experto en sistemas por el que las plantaciones adoptaron la tecnología, sino escuchando las experiencias de los vecinos. Hubo una fuerte labor por parte de Extensión de Cenipalma para llevar a los especialistas a cada rincón de las zonas palmeras, sin embargo, sin la estrategia mencionada, llegar al nivel de adopción que se tiene en la actualidad en la que se estima que plantaciones que suman cerca de 200.000 ha llevan a cabo el registro digital de datos con CyberTracker u otra aplicación, no hubiese sido posible. Adicionalmente, fue en el proceso de adopción y en el compartir experiencias que se encontraron las múltiples funcionalidades que han aportado el alto valor agregado que tiene la tecnología.

La adopción de esta ha estado principalmente en manos de las grandes plantaciones, sin embargo, con el pasar del tiempo las medianas han empezado un proceso similar. Se resalta el papel que jugó en 2016 José Gómez Tamara, de San Pablo (Bolívar), tal vez el primer productor de mediana escala, que decidió vivir la aventura de implementar la tecnología en su plantación.

La ruta que se ha tomado para llevar la tecnología a los medianos y pequeños palmicultores ha sido la de la asistencia técnica que brindan los Núcleos a los palmicultores. Por ejemplo, Hernando Navarro de Palmas del Cesar (San Martín, Cesar), con el equipo de asistencia técnica del Núcleo ha llevado la tecnología a más de 200 palmicultores, y ha logrado ser un ejemplo de articulación de las tecnologías digitales a través de esta herramienta.

Mejoras

La tecnología del registro digital de datos en el cultivo de palma de aceite no permaneció estática, en más de una década de implementación se han introducido mejoras o se han descubierto funcionalidades a raíz de las necesidades que se han presentado en las diferentes plantaciones que la han adoptado.

Más o menos en 2013, Harold Fernández, ingeniero del área de tecnología e informática de la entonces plantación Oleaginosas Las Brisas S. A., manifestó que sería interesante considerar la tecnología de codificación *Quick Response* (QR) que (para ese

momento su uso era de redireccionar a páginas web) se estaba empezando a masificar, para llevar a cabo la marcación unívoca de las palmas en el cultivo.

Si cada palma contara con este tipo de código, que podía ser leído por aplicaciones en los *smartphones*, se podría prácticamente anular el error de ingreso del geocódigo “Línea-Palma”, porque el operario lo que haría es poner el dispositivo a leerlo y la información saldría de la base de datos de la palma. Dando respuesta a esta inquietud y convencidos de que este tipo de código; aún extraño para muchos, con una apariencia como si se tratara de un mensaje extraterrestre, y muy diferente a lo conocido tradicionalmente en el ámbito de códigos de barras; iba a tener un protagonismo en el futuro próximo, el equipo de Geomática de Cenipalma decidió aportar al mundo del Open Source y a la comunidad en general (Figura 5), el desarrollo comisionado del módulo de lectura QR en CyberTracker.

Fue el 1 de diciembre de 2014 cuando esta funcionalidad vio la luz (Rincón-Romero *et al.*, 2016), marcando un hito importante, pues se abrió una alternativa para habilitar la identificación inequívoca de las palmas en campo, mitigando la necesidad del uso de equipos móviles más sofisticados y costosos, pues solo era necesaria una tarjeta con este código único impreso y ubicada en un sitio visible de la palma.

En ese entonces se vislumbraba que las redes informáticas inalámbricas llegaban para quedarse. En los inicios de adopción de la tecnología era frecuente encontrar en las plantaciones una escena similar a las centrales telefónicas de la década de los noventa, una

red completa de cables de carga y transferencia de datos conectados a los equipos de registro de datos.

Desde 2008 CyberTracker ofrecía la funcionalidad de que los dispositivos enviaran los datos a través de protocolos de transmisión de datos como *file transfer protocol* (FTP), no obstante, la necesidad de dicha funcionalidad solamente fue considerada hasta 2015 cuando la insistencia de Diana Padilla, Ingeniera de Calidad de Agroindustrias Villa Claudia S. A. (San Vicente de Chucurí, Santander), para solucionar los problemas de tener que conectar más de 20 equipos para descargar los datos de la jornada, llevaron a explorar y encontrar que era posible transmitirlos por internet o intranet (principalmente por la deficiente conectividad que se presenta en las plantaciones a la red de internet).

En 2017 CyberTracker implementó la funcionalidad de instalación de formularios vía web, similar a lo que se hacía para transferencia de datos, con esto sería posible prescindir de los cables. Pero fue hasta 2019 cuando los señores: Riveros (Gerente) y Yeison Charry (Ingeniero de Tecnología e Informática), de Oleaginosas San Marcos S. A. (San Carlos de Guaroa, Meta), teniendo la necesidad de actualizar de manera diaria los formularios en los dispositivos, pusieron en funcionamiento la opción de que al conectarse a una dirección de internet (o intranet), en donde se ponen las definiciones de los formularios, pudieran instalarlos sin necesidad de conectar cable a ningún computador. En las nuevas versiones, en el momento de abrir la aplicación el dispositivo busca actualizaciones del formulario y las instala.

Figura 5. Contribución de Cenipalma al desarrollo del módulo de lectura de QR, tomado de “About CyberTracker” desde la interfaz Desktop de esta aplicación



Quizá la mejora más importante y a la vez más imperceptible ha sido la de poner en la esfera de los sistemas de información que ofrece el mercado a las plantaciones, la necesidad de que se considere el registro digital en campo con formularios electrónicos, sin importar que sea CyberTracker u otra aplicación, en un ciberespacio cada vez más atiborrado de *Apps* para *smartphones*. En la actualidad un sistema para la gestión de datos de plantaciones no puede ser considerado útil si no cuenta con una alternativa para su registro en campo. Este registro ha enseñado que el hecho de adquirir datos directamente en la fuente no solo minimiza errores y aumenta la oportunidad, sino que puede llegar a generar valor agregado como es el caso de información para supervisión.

La llegada de Geopalma®

Geopalma® PRO, uno de los sistemas de información para gestión de plantaciones que se ofrece en el mercado hoy día a través de Tecnopalma y que fue un resultado materializado y madurado desde proyectos de investigación de Cenipalma, en su primera versión integró el registro digital de datos de campo a través de formularios en CyberTracker. Conectar la base de datos de Geopalma® con la estructura de almacenamiento de CyberTracker requería de una serie de configuraciones de conexión que en principio permitieron la comunicación entre los dos sistemas, sin embargo, la condición maleable de los formularios de CyberTracker generaba dificultades en las condiciones de estandarización que requería *Geopalma®*, lo cual afectaba el funcionamiento continuo de la herramienta, pues en muchos casos la información se perdía o el proceso de recuperación de los mismos requería un conocimiento profundo de la misma. Sus constantes actualizaciones generaban problemas en la integración y cuando, por ejemplo, ingresaban nuevos trabajadores, era necesario hacer cambios en la base de datos y en los mismos formularios.

Hacia 2018, Geopalma® lanzó su primera versión de formularios para captura de datos en dispositivos móviles en su aplicación Geopalma® App (Figura 6) (esta, de manera integrada al *software*, se ejecutaba en dispositivos Android) e inició con la implementación de formularios de sanidad. Luego, de manera progresiva incorporó nuevos para registros de producción, polinización, labores y supervisión, entre otros.

Actualmente, la tecnología permite que cerca de 30 plantaciones hagan realidad la captura, almacenamiento estructurado y gestión de los datos para la toma de decisiones en los aspectos técnicos y administrativos del cultivo. Geopalma® PRO sigue en desarrollo y adaptándose, de la mano de los palmicultores, a las realidades de un sector tan dinámico como el de la palma de aceite en Colombia y Suramérica.

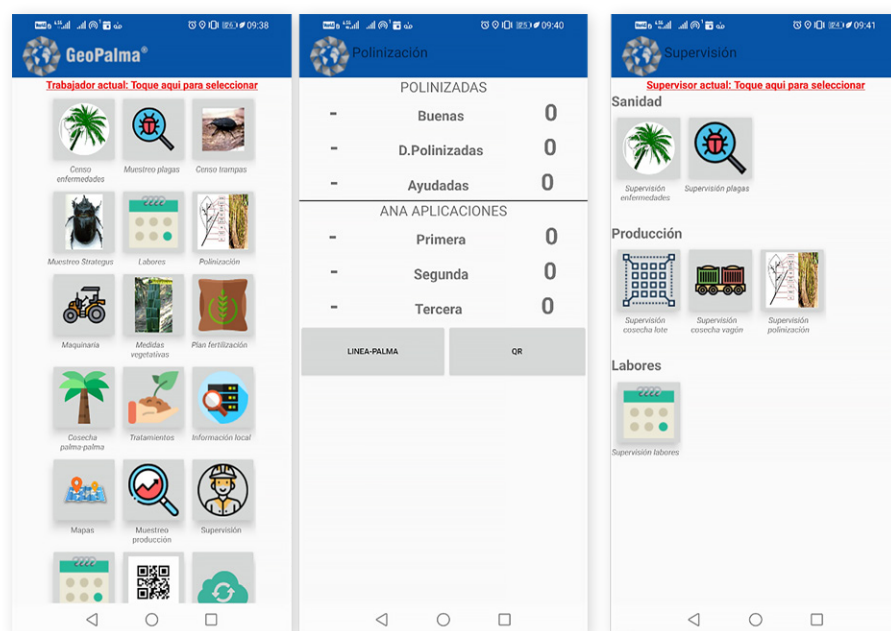
Corolario

No ha sido el *software* ni los dispositivos móviles, ha sido el esfuerzo de muchas personas en todos los niveles de las organizaciones palmeras y del Centro de Investigación lo que ha permitido manejar el nivel de adopción logrado hoy. Este, a su vez, es una motivación para cada día innovar y entregar nuevas funcionalidades que correspondan al esfuerzo de crear, aprender, equivocarse y tener paciencia durante más de 13 años de implementación de formularios digitales en el cultivo de palma de aceite. La adopción también fue posible gracias a la terquedad e interés de los colaboradores de las plantaciones que, además de la carga laboral que tienen, se la han jugado por innovar en los procesos de la mano del registro digital de datos.

Lo que antes era considerado una tecnología ajena al trabajador en el campo, hoy es una condición *sine qua non* para que el agricultor de este siglo se incorpore en la transformación digital, una transformación a la cual la agricultura no es ajena (Agricultura 4.0), y mucho menos la palmicultura colombiana, motor de desarrollo de muchas regiones, empresas y personas.

Los autores quieren expresar un sincero reconocimiento a Ismael Devia, de Puerto Gaitán; Raúl Villorina, de Puerto Wilches; Jhon Castillo, de Puerto Wilches; Michel Ciro, de San Pablo; Carlos Rosado, de Barrancabermeja; el señor López, en Sabana de Torres; Miguel Hernández, de Tibú; el señor Acevedo, de Orocué; el señor Morales, de Cumaral; y William Coral, en María La Baja, la lista es grande y la memoria corta, así que igualmente un reconocimiento a tantos que quedaron sin nombrar pero que de la misma manera se han aventurado en la ruta de la innovación. A los extensionistas de Cenipalma quienes han tenido la habilidad de escuchar las necesidades de los palmicultores, transmitir las a los expertos y acompañar el proceso de adopción de la tecnología.

Figura 6. Pantallas de Geopalma® App



Referencias

- Ansell, S. & Koenig, J. (2011). CyberTracker: An Integral Management Tool Used by Rangers in the Djelk Indigenous Protected Area, Central Arnhem Land, Australia. *Ecological Management & Restoration* 12.
- Araque-Torres, L. & Forero, D. C. (2009). Análisis de los sistemas de captura y procesamiento de información para la toma de decisiones en el manejo de los insectos defoliadores de la palma de aceite en Colombia. *Revista Palmas*, 30(1).
- Beltrán, J., Oulver, J. Guerrero, J. & Mosquera, M. (2015). Cerrando brechas de productividad con la estrategia de transferencia de tecnología Productor a Productor. *Revista Palmas*, (36) 39-53.
- Ciro-Hoyos, M. & Rincón-Romero, Víctor Orlando. (2014). Uso de dispositivos móviles para la captura de datos en campo con formularios electrónicos a través del programa CyberTracker. *Revista Palmas*, 35(4),127-36.
- Rincón-Romero, V., Molina-Villarreal, A., Zabala, A., Barrera, O. & Torres, J. L. (2016). Marcación de palmas con códigos QR. En *XIII Reunión Técnica Nacional de Palma de Aceite*.
- Rincón Romero, V., Molina, A. & Torres J. L. (2015). *Elaboración de formularios móviles digitales para el registro de datos en plantaciones de palma de aceite (principios básicos)*. Bogotá D. C.: Cenipalma.

Dinámica de la comunidad microbiana y generación de electricidad en CCM inoculadas con lodos POME y cultivo electrogénico puro*

Microbial Community Dynamics and Electricity Generation in MFCs Inoculated with POME Sludges and Pure Electrogenic Culture

CITACIÓN: Albarracín-Arias, J. A., Yu C. P., Toshinari M., Valdivieso-Quintero, W. & Sánchez-Torres, V. (2022). Dinámica de la comunidad microbiana y generación de electricidad en CCM inoculadas con lodos POME y cultivo electrogénico puro (Traductor Arenas C). *Palmas*, 44(1), 29-50.

PALABRAS CLAVE: Celda de combustible microbiana, Efluentes de aceite de palma, *Shewanella*, Lodo, Dinámicas de comunidades microbianas.

KEYWORDS: Microbial fuel cell, Palm oil mill effluent, *Shewanella*, Sludge, Microbial community dynamics.

* Reimpreso del *International Journal of Hydrogen Energy*, volumen 46, numero 74, Albarracín-Arias, J. A., Yu C. P., Toshinari M., Valdivieso-Quintero, W. & Sánchez-Torres, V. Microbial Community Dynamics and Electricity Generation in MFCs Inoculated with POME Sludges and Pure Electrogenic Culture, 14 páginas, Copyright (2022), con permiso de Elsevier.

doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.08.218>

ALBARRACÍN ARIAS, JORGE A.

Escuela de Ingeniería Química,
Universidad Industrial de Santander,
Bucaramanga, Colombia.

YU CHANG PING

Instituto de Posgrado de Ingeniería
Ambiental, Universidad Nacional de
Taiwán, Taipei, 106, Taiwán.

TOSHINARI MAEDA

Departamento de Ingeniería de
Funciones Biológicas, Kyushu Institute
of Technology, Kitakyushu, Japón.

VALDIVIESO QUINTERO, WILFREDO

Universidad de Santander, facultad
de Ciencias Naturales, Bucaramanga,
Colombia.

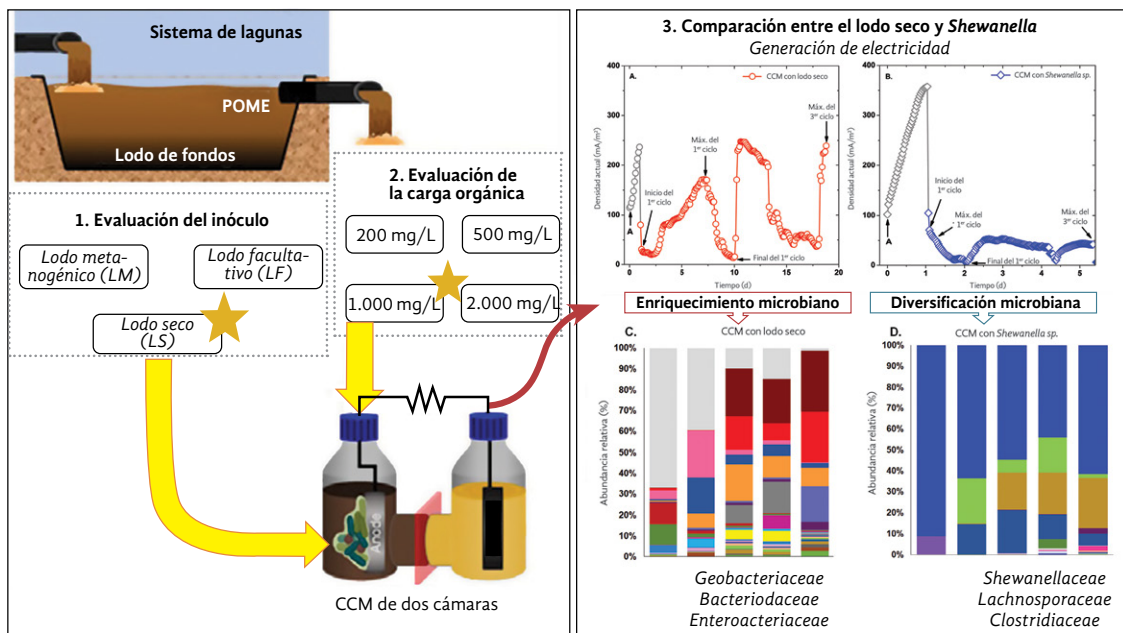
SÁNCHEZ TORRES, VIVIANA

Escuela de Ingeniería Química,
Universidad Industrial de Santander,
Bucaramanga, Colombia.
Autor para correspondencia
visantor@uis.edu.co

Lo más destacado

- Se evaluó el efecto de 3 tipos de lodo de POME como inóculo en CCM.
- La CCM con lodo seco generó 250 mA/m² y 3,30 W/m³, consumiendo el 71 % de la DQO.
- El género *Geobacteria* de los lodos secos predominó después de 3 ciclos de tratamiento de POME en CCM.
- La biopelícula del ánodo se enriqueció mediante inoculación con LS y se diversificó con *Shewanella*.

Resumen gráfico



Resumen

Los efluentes del proceso de extracción del aceite de palma (POME por sus siglas en inglés) deben ser tratados antes de su disposición debido a su alto contenido de materia orgánica. En este estudio se evaluó el desempeño eléctrico y la eficiencia del tratamiento de aguas residuales mediante el uso de celdas de combustible microbianas (CCM) para el tratamiento de POME no estéril con una demanda química de oxígeno (DQO) de 200 a 10.000 mg/L. Dado que el tipo de inóculo es un factor clave en el desempeño de las CCM, se evaluaron como inóculo 3 tipos de lodo (lodo metanogénico (LM), lodo facultativo (LF) y lodo seco (LS), obtenidos de las lagunas de tratamiento de POME actuales. El lodo seco (LS) desarrolló una potencia máxima de salida de 3,30 W/m³ al oxidar el 71 % de la DQO proporcionada por el POME (1.000 mg/L). Además, la microbiota del POME crudo contribuyó a un enriquecimiento de la comunidad en el inóculo de LS durante la operación, en la que *Geobacter* fue el género predominante, alcanzando una generación de corriente de 247 mA/m² y una densidad de potencia de 2,36 W/m³. Por el contrario, la inoculación con una especie electrogénica pura (*Shewanella* sp.) condujo a un proceso de diversificación, lo que resultó en una generación de corriente más baja de 52 mA/m² y una densidad de potencia de 0,10 W/m³. En consecuencia, la dinámica de la comunidad microbiana reveló que la inoculación de CCM tiende a un equilibrio microbiano en el que se logró la generación de una alta densidad de corriente mediante el enriquecimiento microbiano gradual en lugar de una invasión electrogénica externa.

Abstract

Palm Oil Mill Effluent (POME) requires treatment before disposal due to its high organic matter content. In this study, the electrical performance and wastewater treatment efficiency were evaluated for Microbial Fuel Cells (MFC) treating unsterile POME with chemical oxygen demand (COD) from 200 to 10 000 mg/L. Since the inoculum type is a key factor in MFC performance, three types of sludge (methanogenic sludge (MS), facultative sludge (FS), and dry sludge (DS), obtained from the current POME treatment ponds were evaluated as inoculum. Dry sludge (DS) developed a maximum power output of 3.30 W/m³ by oxidizing 71% out of the COD provided by POME (1.000 mg/L). Also, raw POME microbiota contributed to an enrichment

of the community in DS inoculum along with the operation, in which *Geobacter* was the predominant genus reaching a current generation of 247 mA/m² and a power density of 2.36 W/m³. Conversely, pure electrogenic (*Shewanella* sp.) inoculation led to a diversification process, resulting in a lower current generation of 52 mA/m² and a power density of 0.10 W/m³. Consequently, microbial community dynamics revealed that MFC inoculation tends to a microbial equilibrium wherein generation of high current density was achieved by gradual microbial enrichment rather than external electrogenic invasion.

Introducción

La investigación y el desarrollo de tecnologías ambientales y energía verde son necesarios para enfrentar desafíos globales como la mitigación del cambio climático, la contaminación ambiental y la seguridad energética. Las fuentes de energía verde corresponden a fuentes renovables: por ejemplo, hidrógeno, combustibles de biomasa, energía eólica, geotérmica y celdas fotovoltaicas [1]. Los intereses científicos no solo se centran en la búsqueda de nuevas formas de energía verde, sino también en la mejora de los sistemas de generación de energía para alcanzar los objetivos de eficiencia. Por ejemplo, los microcombustores de hidrógeno se han optimizado en términos de eficiencia mediante análisis numérico, modificación de la arquitectura del reactor o sistemas de inyección del combustible [2,3]. Otro enfoque es la hibridación de las fuentes de energía renovables, como los sistemas fotovoltaicos y eólicos acoplados a unas celdas de combustible alcalinas. Esta configuración conceptual produjo 221,3 g por hora de combustible de hidrógeno y 10,5 kW de electricidad con una eficiencia del 56,9 % [4].

También es posible producir energía verde a partir del tratamiento de residuos orgánicos enlazado a la generación de energía (aprovechamiento energético de residuos, WtE (por sus siglas en inglés)) [5]. Dentro de este concepto se han estudiado tecnologías basadas en la actividad microbiana para tratar residuos como la digestión anaeróbica (DA) y los sistemas bioelectroquímicos para el tratamiento de aguas residuales y biomasa, al mismo tiempo que se aprovecha su energía química. Algunas alternativas que funcionan con microbios convierten la materia orgánica en otro vector de energía, como el biogás o el hidrógeno. Se ha encontrado que la DA de los desechos orgánicos produce tanto biogás que contiene metano con un valor calorífico inferior, que oscila

entre 10,7 y 25,1 MJ/Nm³, como el digestato, que se procesa posteriormente para cumplir con los requisitos de descarga o se utiliza como fertilizante y acondicionador del suelo [6]. El biohidrógeno producido a través de la fermentación se estudia intensamente debido a sus beneficios ambientales y su eficiencia energética. La fermentación oscura y la conversión por fotofermentación han sido los procesos más comunes para producirlo; sin embargo, actualmente la optimización se aborda mediante la aplicación de ambas tecnologías. En este sentido, Ghosh *et al.* [7] revisaron estudios que integraban la fermentación oscura y la fotofermentación, exponiendo la mejora en el rendimiento de hidrógeno mediante el uso de sistemas integrados de un solo paso.

Además, los sistemas bioelectroquímicos como las celdas de combustible microbianas (CCM), celdas de electrólisis microbiana (CEM) o celdas de desalinización microbiana (CDM) son alternativas sostenibles para obtener energía a partir de los desechos. Las CCM son sistemas que transforman directamente la energía química presente en los compuestos orgánicos en energía eléctrica a través del metabolismo biológico de bacterias electrogenéticas [8]. En este sentido, las aguas residuales ricas en materia orgánica son propicias para alimentar las CCM y simultáneamente recolectar energía. Las CCM se han configurado para utilizar y tratar aguas residuales domésticas, residuos de alimentos y aguas residuales del sector lácteo, cervecero y de aceite de palma [9-12].

El aceite de palma es una materia prima clave para producir alimentos, cosméticos, productos farmacéuticos y biodiésel. A nivel mundial, en 2019 se produjeron 73,9 millones de toneladas de aceite de palma. En el proceso de extracción del aceite de palma se produce una cantidad considerable de aguas residuales, principalmente en dos etapas: la esterilización de los racimos de fruta fresca y la clarificación

del aceite crudo. El efluente del proceso de extracción de aceite de palma (POME¹) es una suspensión coloidal ácida, de color pardo, con altos valores de demanda química y biológica de oxígeno (DQO y DBO), que superan los 55.000 mg/L y los 25.000 mg/L, respectivamente. Por cada tonelada de aceite de palma crudo se producen aproximadamente 2,5 toneladas de POME [13]. Por lo tanto, el tratamiento adecuado del POME es indispensable para cumplir con los requisitos ambientales. Hoy en día, el tratamiento más utilizado es el sistema de lagunas, en el que el POME fluye a través de lagunas de enfriamiento, anaeróbicas y facultativas en serie antes de descargar el agua tratada a las corrientes de agua superficial o reciclarla como agua de riego. Infortunadamente, este método de tratamiento tiene una baja eficiencia debido a la sedimentación de sólidos en el fondo de las lagunas y a los largos tiempos de retención hidráulica [14]. En consecuencia, las CCM surgen como una tecnología alternativa para complementar el proceso de tratamiento de POME, pues contribuye a la degradación de la materia orgánica y añade valor a las aguas residuales al producir electricidad [15].

Cheng *et al.* demostraron que es posible utilizar el POME como donante de electrones para generar electricidad y lograron una eliminación de la DQO superior a 96,5 % mediante el uso de un sistema integrado de 2 CCM y 1 filtro biológico aireado inmovilizado [16]. Posteriormente, se evaluaron las CCM de doble cámara con diferentes concentraciones de POME en el compartimiento del ánodo [17]. A pesar de los resultados prometedores obtenidos en términos de tratamiento de aguas residuales (es decir, eliminación del 70 % de la DQO), se reportó una baja densidad de potencia (0,149 W/m³) utilizando lodo anaeróbico (LA) como inóculo.

La mayoría de los estudios sobre CCM para tratar POME han utilizado LA como la fuente de bacterias para degradar el POME [16-19]. Aunque el LA logra una alta eliminación de materia orgánica, dicho consorcio natural contiene una diversidad bacteriana que podría afectar al rendimiento eléctrico debido a los metabolismos fermentativos o metanogénicos que compiten por los donantes de electrones [20,21]. En consecuencia, se han evaluado los cultivos ais-

lados como biocatalizadores en CCM para tratar POME. En el POME hay una variedad de sustancias orgánicas complejas que no son fácilmente digeribles por la mayoría de las bacterias. Por ejemplo, Md Nor *et al.* estudiaron el rendimiento de las CCM de doble cámara que tratan la descarga final de POME esterilizado, comparando las CCM inoculadas con LA de las lagunas de tratamiento de POME con las CCM inoculadas con la *Pseudomonas aeruginosa* ZH1 que fue aislada del POME [22]. Esta comparación reveló que las CCM inoculadas con un cultivo puro de la cepa ZH1 generaban 5 veces más energía (2,91 x 10⁻³ W/m³)² que las CCM inoculadas con LA de POME (0,55 x 10⁻³ W/m³). Sin embargo, el mismo estudio mostró una menor eliminación de DQO por ZH1 (3 %) que por LA (13 %), debido a la limitación en el consumo de POME por ZH1. Baranitharan *et al.* [23] reportaron resultados similares y evaluaron un inóculo controlado (IC) constituido por 4 microorganismos aislados de LA. La generación de potencia fue 2 veces mayor en las CCM inoculadas con un IC (*Pseudomonas aeruginosa*, *Azospira oryzae*, *Acetobacter peroxydans* y *Solimonas variicoloris*) que la obtenida en las CCM inoculadas con LA. Además, la eficiencia coulombimétrica fue de 74 % para las CCM de IC y de 24 % para las CCM de LA, lo que demostró la capacidad de convertir la energía química en corriente eléctrica. Sin embargo, la eliminación de la DQO fue significativamente menor en las CCM de IC (34 %) que en las CCM de LA (70 %), lo que indica la falta de microorganismos que degradan el POME en el IC [23]. Otros estudios han utilizado CCM con POME estéril inoculado con cultivos puros de *Klebsella variicola*, *P. aeruginosa* y *Bacillus cereus*, obteniendo potencias de 4,5 W/m³, 4,1 W/m³ y 3,9 W/m³, respectivamente. Además, se alcanzó una mejora en la eliminación de DQO que oscila entre 54 % y 74 %, a pesar de ser CCM inoculadas con cultivos puros [24,25]. Sin embargo, no está claro qué tipo de inóculo conduce a una alta degradación de la materia orgánica y a la recuperación de energía. Además, en una aplicación real el uso de POME esterilizado para alimentar a las CCM implica altos costos operativos. En este sentido, se hace necesario evaluar el efecto de diferentes tipos de inóculos sobre las comunidades microbianas para dilucidar el rendimiento eléctrico en las CCM. A través del análisis de electroforesis

1 Abreviaturas POME: Efluente del proceso de extracción de aceite de palma, LM: Lodo metanogénico, LS: Lodo seco, LF: Lodo facultativo, LA: Lodo anaeróbico, SHE: *Shewanella* sp., IC: Inóculo controlado, EC: Eficiencia coulombica.

2 Datos originales en mW/m². La densidad de energía en W/m³ se calculó con los datos que se muestran en el artículo citado.

en gel con gradiente de desnaturalización (DGGE por su sigla en inglés), Baranitharan *et al.* [19] observaron que la microbiota en el ánodo cambió del día 3 al día 14 de operación a una comunidad menos diversa, lo que reflejó una producción de corriente estable. Sin embargo, no se identificaron las especies responsables de este rendimiento eléctrico para asociar el desarrollo de biopelículas con la producción de corriente eléctrica.

Por lo tanto, en este estudio se proponen tres tipos de lodo de una planta de beneficio de aceite de palma como una fuente adecuada de microorganismos para el tratamiento de POME no estéril en CCM de doble cámara. El hecho de que la microbiota presente en los lodos del sistema de lagunas se utilice para degradar el POME a baja concentración de oxígeno sugiere que sería posible encontrar bacterias capaces de generar corriente eléctrica mientras se consume materia orgánica del POME.

La comunidad bacteriana se analizó en la biopelícula del ánodo en diferentes etapas de la operación para las CCM que trataban el POME no esterilizado inoculado con un consorcio natural (lodo) frente a las CCM inoculadas con una cepa bacteriana electrogénica (*Shewanella* sp.). El análisis de abundancia relativa y los índices de diversidad en diferentes momentos a lo largo de tres ciclos de operación de CCM indica la importancia de tener una comunidad diversa con bacterias hidrolíticas y bacterias electrogénicas adaptadas al sustrato. En consecuencia, se expone el uso potencial de POME y sus lodos como combustible y biocatalizador, respectivamente, para la generación de electricidad sostenible en las CCM.

Materiales y métodos

Efluente del aceite de palma e inóculos

El POME y el lodo se obtuvieron de una planta de beneficio de extracción de aceite de palma en Santander, Colombia. El POME fresco se tomó después del proceso de extracción del aceite, justo antes de ingresar a la laguna de enfriamiento. Se recogieron tres tipos de lodos para utilizarlos como inóculo: i) lodos del fondo de la laguna metanogénica (LM); ii) lodos del fondo de la laguna facultativa (LF), y iii) lodos secos acumulados en una pila tras ser retirados de las lagunas de tratamiento de POME durante su mantenimiento (LS). Las muestras se almacenaron

en recipientes de plástico esterilizados a 4 °C para evitar la degradación hasta su uso.

Efecto de la carga orgánica

Se establecieron CCM con diferentes DQO iniciales en la cámara del ánodo para determinar la concentración de DQO adecuada para tratar POME. En primer lugar, se ensayaron las CCM con una DQO inicial de 1.000 y 10.000 mg/L para los tres tipos de lodo como inóculo. Se llevó a cabo una evaluación adicional basada en el mejor lodo con una carga de DQO inicial de 200, 500, 1.000 a 2.000 mg/L.

Construcción y funcionamiento de las CCM

Las CCM de doble cámara se ensamblaron a partir de botellas de vidrio modificadas con tapa rosca y capacidad de 150 mL. Las cámaras del ánodo y cátodo se separaron mediante una membrana de intercambio catiónico de polietileno estireno-divinilbenceno (Grion 0011 V, Hangzhou Grion Environmental Technology Co., China). La membrana se trató previamente mediante remojo 24 h en H₂SO₄ al 3 % seguido de 2 lavados consecutivos con agua destilada estéril justo antes del ensamblaje. Los filtros de carbono (4 cm x 1,5 cm x 0,9 cm) fueron tratados térmicamente a 450 °C [26] y utilizados como electrodos en ambos compartimentos. Alambre de titanio pulido se conectó a los electrodos y a una resistencia externa de 1.000 Ω. El compartimiento del ánodo se llenó con 125 mL (volumen de trabajo) de POME no esterilizado diluido a una DQO que varió de 200 a 10.000 mg/L en un buffer de fosfato 0,1 M y se usaron 125 mL de ferricianuro de potasio (III) 0,05 M con un buffer de fosfato 0,1 M como aceptor de electrones en la cámara del cátodo. El pH se ajustó a 7,0 en ambas cámaras. La configuración del reactor se muestra en la Figura 1.

La inoculación se llevó a cabo después de que se ensamblaron las CCM. Se agregó 1 mL (0,8 % v/v) de LM (47,8 g VSS/L), LF (15 g VSS/L) o LS (98 g VSS/L) a la cámara del ánodo. Además, se instaló una CCM con POME diluido (CCM-P) (sin adición de lodos) y otra CCM con POME diluido esterilizado como control, a la misma concentración que las CCM inoculadas para comparar el efecto de la adición de lodos. Se inyectó gas nitrógeno durante 3 minutos para eli-

minar el oxígeno del espacio de cabeza de la cámara anódica. Antes de la recolección de corriente eléctrica, las CCM se aclimataron durante 24 horas en condiciones anaeróbicas en circuito abierto (electrodos desconectados) para promover el enriquecimiento de bacterias capaces de degradar el POME.

Análisis de datos

Rendimiento eléctrico

El potencial de las celdas (V) se monitoreó a través de una resistencia de 1 k Ω en intervalos de 10 min. El sistema de adquisición de datos se construyó con base en ARDUINO UNO (Arduino, Italia) y el *software* se codificó utilizando MATLAB 2017B (The MathWorks, Inc., EE. UU.). El convertidor analógico a digital ADS1115 (Texas Instruments, EE. UU.) se conectó a un multiplexor I2C TCA9548A (Texas Instruments, EE. UU.) y un microprocesador ARDUINO UNO (Arduino, Italia). Las curvas de polarización se obtuvieron variando la resistencia externa desde potencial de circuito abierto (OCP), 5.000, 2.530, 1.290, 680, 370, 330, 290, 260, 220, 180, 140, 100, y 60 Ω , con cada resistencia probada durante un máximo de 20 min utilizando el potenciómetro digital 5254 CE (Analog Devices, Inc., EE. UU.). La corriente, I , a través de la resistencia externa, R , se

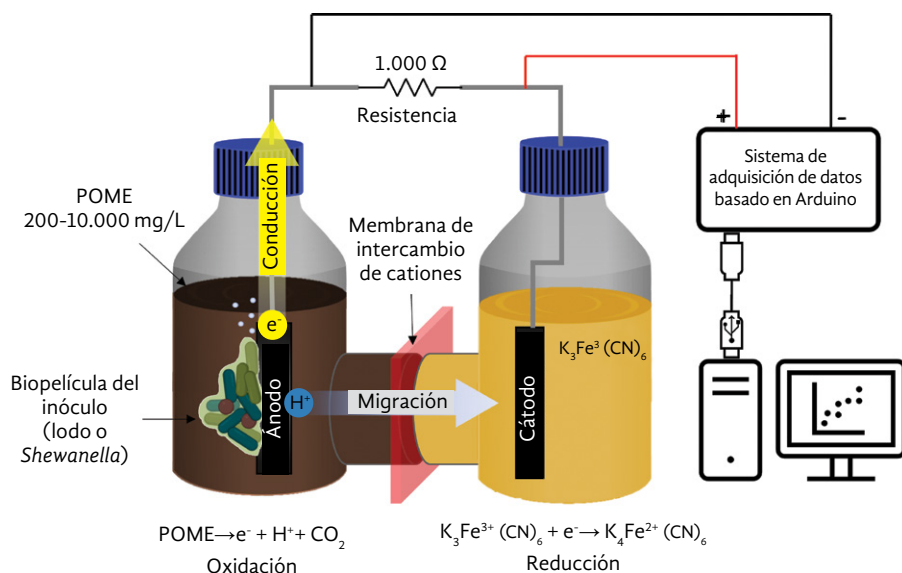
calculó utilizando la ley de Ohm; $V = IR$. La potencia de salida, P , se calculó mediante $P = IV$. La densidad de corriente (mA/m²) y la densidad de potencia (mW/m² o W/m³) se calcularon dividiendo la corriente y la potencia obtenidas por el área de superficie proyectada ($2,19 \times 10^{-3}$ m²) del ánodo o el volumen de trabajo ($1,25 \times 10^{-4}$ m³) de la cámara del ánodo.

Eficiencia en el tratamiento de aguas residuales

Para evaluar el efecto de cada inóculo, se analizaron los parámetros de las aguas residuales antes y después de cada ciclo de alimentación por lotes del desempeño de las CCM. La DQO se midió utilizando el sistema y el *kit* de medición de DQO (Lian-Hua Technology Co., China). El carbono orgánico e inorgánico total se analizaron mediante el analizador TOC-Vcph (Shimadzu, Japón). Los sólidos suspendidos totales (SST) y los sólidos suspendidos volátiles (SSV) se midieron gravimétricamente de acuerdo con el método estándar 2540 (APHA, 1998). La salinidad, la conductividad y los sólidos disueltos totales se midieron mediante un equipo multiparámetros (HQ40d, HACH, EE. UU.).

La eficiencia coulombimétrica (EC) es el porcentaje de la carga eléctrica total que se transfiere al ánodo desde el sustrato respecto a la carga máxima

Figura 1. Esquema de operación para celdas de combustible microbianas (CCM) utilizadas en estudios experimentales.



posible que se puede obtener si el microorganismo puede digerir todo el sustrato para producir corriente. Por lo tanto, la EC es el total de culombios calculados debido a la corriente producida a lo largo del tiempo, dividido por los culombios teóricos que se pueden producir a partir del sustrato en términos de DQO (Ecuación 1).

$$EC = \frac{M \int_0^t I dt}{F b V_r \Delta DQO} \times 100 \quad (1)$$

donde M ($g O_2/mol O_2$) es el peso molecular del oxígeno molecular, I (A) es la corriente calculada usando $V = IR$, t (s) es el tiempo de finalización del ciclo, F es la constante Faraday ($96\,500\,C/mol\,e^-$), $b = 4$ ($mol\,e^-/mol\,O_2$) indica el número de electrones intercambiados por molécula de oxígeno, V_r (L) es el volumen de trabajo del reactor, y ΔDQO ($g\,O_2/L$) es el cambio en la demanda química de oxígeno en el tiempo t .

Microscopía electrónica de barrido (SEM)

La morfología de la biopelícula del ánodo se examinó con un microscopio electrónico de barrido (S-4800, Hitachi Corp., Japón). Para la microscopía electrónica de barrido (SEM), se cortaron pequeños trozos del ánodo y se retiraron asépticamente. Las muestras se fijaron con glutaraldehído al 2,5 % durante 4 h, luego se enjuagaron con buffer de fosfato 0,1 M (pH = 7,2-7,4) 2 veces y se deshidrataron con una serie de etanol gradual de 30 a 100 % durante 10 min a 4 °C en cada etapa. Después de la deshidratación, las muestras se secaron en punto crítico y se recubrieron con oro pulverizado al vacío para el examen SEM.

Análisis de la comunidad microbiana

El desempeño de las CCM se comparó utilizando un inóculo mixto natural o un inóculo de cultivo puro de una bacteria electrogénica, en términos de la generación de corriente. Se inocularon 2 conjuntos de CCM con lodo seco (CCM-LS) o *Shewanella* sp. (CCM-SHE). Cada grupo se operó durante 3 ciclos de alimentación por lotes y se registró la corriente. Se propusieron 5 puntos durante la operación para extraer el ADN bacteriano y proceder con la secuenciación: i) el inicio de la aclimatación de 24 h en condiciones anaeróbicas y de circuito abierto (A); ii) puesta

en marcha del primer ciclo; iii) el máximo del primer ciclo; iv) la etapa de agotamiento del sustrato al final del primer ciclo, y v) el máximo del tercer ciclo.

Extracción de ADN, amplificación por PCR y secuenciación

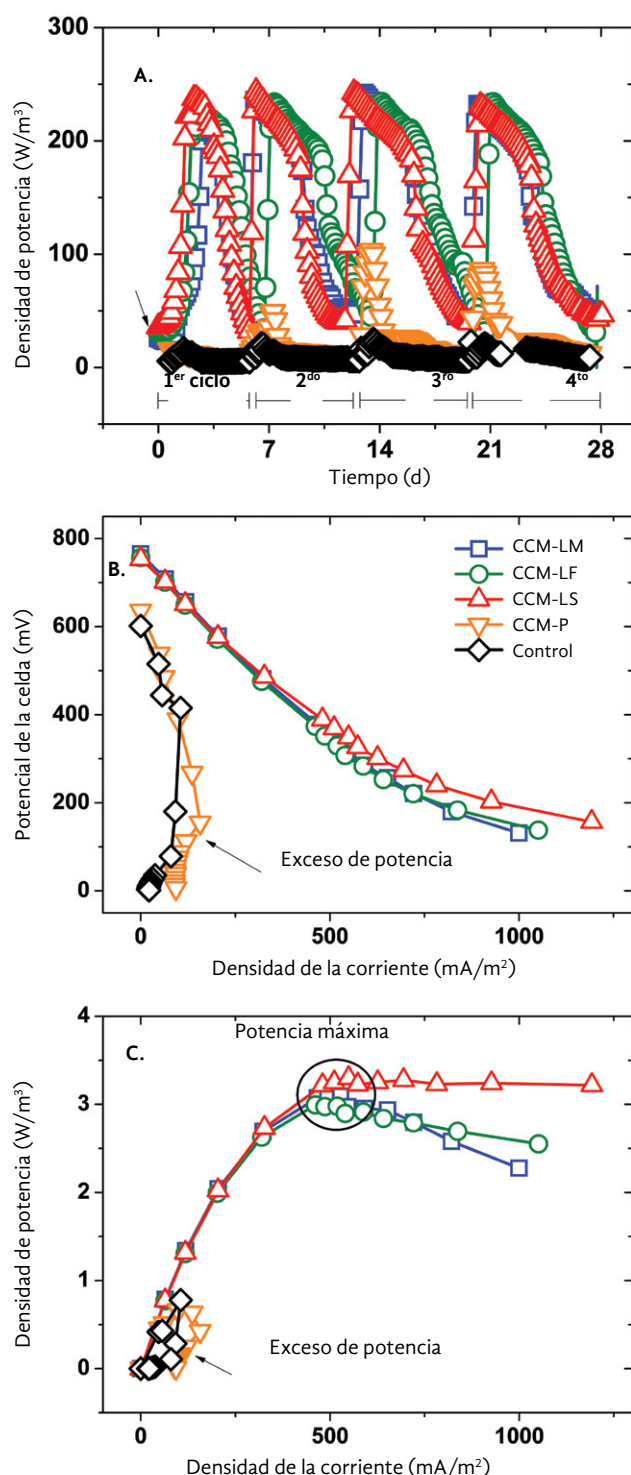
En cada fase se extrajo el ADN de las células unidas al material del ánodo en las CCM utilizando el *kit* SPIN para suelos de FastDNA (Qbiogene-MP Biomedicals, Irvine, CA, EE. UU.). La calidad del ADN se midió utilizando un espectrofotómetro NanoDrop 1000 (Thermo Scientific, Waltham, EE. UU.) y se visualizó utilizando electroforesis en gel de agarosa al 1,0 %. Las regiones V3 y V4 de los genes de ARNr 16S se amplificaron usando el *primer* de avance (5' TCGTCGGCAGCGTCAGATGTGTAAAGAGACAGCCTACGGGNGGCWGCAG) y el *primer* de reversa (5' GTCTCGTGGGCTCGGAGATGTGTATAAGAGACAGGACTACHVGGGTATCTAATCC) [27]. Las etapas de termociclado se establecieron de la siguiente manera: desnaturalización inicial a 95 °C durante 3 min, seguida de 95 °C durante 30 s, 55 °C durante 30 s y 72 °C durante 30 s, 25 ciclos, y una extensión final de 72 °C durante 5 min. Los amplicones purificados se evaluaron utilizando el *kit* de ensayo Qubit dsDNA HS (Life Technologies, Carlsbad, CA, EE. UU.). Los amplicones se procesaron utilizando el *kit* de preparación de la biblioteca de Nextera XT DNA de acuerdo con Mustapha *et al.* [51]. Los amplicones se secuenciaron usando Illumina MiSeq (cartucho de reactivo V3 MiSeq con 2 extremos emparejados de 300 pb).

Análisis de los datos de secuenciación

Las lecturas fueron recortadas y filtradas por FASTQX y las lecturas de alta calidad se analizaron utilizando el programa bioinformático *Quantitative Insights Into Microbial Ecology* (QIIME) versión 1.9.0 [28] y la base de datos GreenGenes (versión 13.5), que permitió agrupar las secuencias en unidades taxonómicas operativas (OTU).

La diversidad alfa se calculó según el índice de Shannon, que tiene en cuenta tanto la abundancia como la uniformidad de las especies presentes. Los datos crudos de las secuencias se depositaron en la base de datos del NCBI con el número de acceso PRJNA643597.

Figura 2. Desempeño eléctrico de las CCM inoculadas con 0,8 % v/v de LM, LF o LS, y CCM sin inóculo de lodo (P). El control es POME estéril a 1.000 mg/L. (A) Curvas de densidad de corriente a lo largo de cuatro ciclos de generación, (B) datos de polarización y (C) curvas de potencia.



Resultados y discusión

Comparación de la generación de corriente con tres tipos de lodo de POME como inóculo

Las curvas de corriente observadas en la Figura 2-A muestran que las CCM inoculadas con los 3 tipos de lodo tuvieron un comportamiento similar. Las CCM cargadas con 1.000 mg/L revelaron picos de densidad de corriente máxima de alrededor de 233 ± 9 mA/m² para las CCM inoculadas con LM, LF y LS que fueron 2,9 veces más altos que las CCM no inoculadas con lodo (CCM-P) y 10 veces más altos que el control. Una carga orgánica inicial de 1.000 mg/L conduce a un ciclo de tratamiento de 7 días aproximadamente. Los ciclos de alimentación discontinua tuvieron una fase de retraso en el primer ciclo y un rápido aumento de la corriente hasta obtener un máximo al final del día 2. Después de este punto, la corriente disminuyó bruscamente, lo que indica el agotamiento del sustrato en la cámara del ánodo; en consecuencia, tanto las soluciones del ánodo como del cátodo se reemplazaron por soluciones (medios) nuevas para permitir un nuevo ciclo de generación. Dado que no se aplicó ninguna inoculación adicional después del reemplazo del medio, estos resultados indican que se desarrolló una biopelícula en la superficie del ánodo y fue capaz de reproducir la densidad de corriente como en el primer ciclo.

Posteriormente, los datos de polarización se obtuvieron variando la resistencia externa (10.000-60 Ω). Las curvas de polarización y potencia (Figura 2-B) fueron similares para las CCM inoculadas con los 3 tipos de lodo, con una desviación estándar promedio de 22 mV. Los datos de polarización revelaron una clara ventaja de la inoculación de lodo. Las CCM de LM, LS y LS generaron un potencial de circuito abierto de alrededor de 760 mV que decaía linealmente a 290 mV a medida que la densidad de corriente aumentaba hasta 600 mA/m², mostrando la misma tendencia. Finalmente, se lograron valores desde 999 a 1.192 mA/m² por cada tipo de lodo debido a una ligera divergencia bajo alta demanda de corriente (valores de resistencia bajos). Por el contrario, la CCM-P tuvo una caída de voltaje aguda a una densidad de corriente inferior a 157 mA/m². La curva de polarización indica pérdidas (sobrepotenciales) en la CCM [29]; por lo tanto, solo las pérdidas óhmicas se identificaron como las más importantes en las CCM inoculadas con lodo debido a la tendencia lineal de las curvas en la Figura. 2-B. La configuración utilizada en este

estudio probablemente explica las pérdidas óhmicas. Por ejemplo, el alambre de titanio como circuito externo para el flujo de electrones puede contribuir a este sobrepotencial. Se puede mejorar mediante el uso de materiales con mejor conductividad eléctrica, como cobre, evitando la inmersión del metal en la solución. Otra razón para la pérdida óhmica es que los protones deben pasar a través de la membrana y esta tiene una resistencia inherente a dicho transporte. A pesar de que el pretratamiento de la membrana se realiza con el objetivo de reducir esta resistencia, se trata de una barrera física entre las cámaras que contribuirá a este sobrepotencial. El diseño de la CCM puede resolver esta limitación eliminando la membrana; sin embargo, deben implementarse técnicas de consumo rápido de oxígeno [30]. De acuerdo con la forma expuesta en las curvas, ni las pérdidas de activación ni la limitación de transferencia de masa fueron predominantes.

Además, la densidad de potencia máxima fue similar para las CCM inoculadas con cada tipo de lodo ($3,1 \pm 0,6 \text{ W/m}^3$) (Figura 2-C). El LS se destaca entre los tres lodos porque los valores de densidad de potencia se mantuvieron cerca de su máximo en un rango más grande de densidades de corriente (549 mA/m^2 a 1.192 mA/m^2). La desviación estándar entre duplicados fue similar para las diferentes configuraciones de CCM, con un valor de $0,36 \text{ W/m}^3$. La curva CCM-LS presentada en la Figura 2-C es opuesta al fenómeno conocido como *overshoot*, común en las curvas de potencia de los estudios de CCM [31]. Como Ieropoulos *et al.* [32] explicaron, los microorganismos pueden ajustar su metabolismo a las condiciones dinámicas. Según esto, la diversidad microbiana del LS podría haber consumido la variedad de compuestos presentes en el POME y superar con éxito la alta demanda de electrones al circuito externo a bajas resistencias ($R < 290 \Omega$).

La inoculación de LS representa una ventaja en el desempeño eléctrico debido al objetivo de una celda de combustible, que es maximizar la potencia en un rango de interés de corriente a una caída mínima de voltaje [8]. Por el contrario, el LM y el LF tuvieron una disminución después del punto de potencia máxima debido a una mayor demanda de corriente.

Eficiencia en el tratamiento de aguas residuales

Durante la evaluación de la eliminación de materia orgánica, se determinaron la DQO, los SST, los SSV y

el COT antes y después de los ciclos de la CCM. Además, se calculó la EC de la CCM según la corriente generada y la eliminación de DQO.

Los resultados resumidos en la Tabla 1 indican una eliminación de DQO similar para los tres tipos de lodo: 66,3 % para LM, 70,1 % para LF y 71,2 % para LS. Estas remociones fueron el promedio después de cada ciclo de 7 días de operación y confirmaron que la generación de electricidad estaba asociada con el consumo de materia orgánica. La eliminación de DQO para CCM-P fue de $59,6 \pm 6,2 \%$, significativamente menor (valor- $p = 0,034$) que la de las CCM inoculadas con lodo (*Media* = $69,8 \pm 4,4 \%$).

Por otro lado, los sólidos y el carbono orgánico están presentes en el POME, por lo que su eliminación es un indicador de su utilización para producir electricidad por parte de las bacterias en la CCM. La eliminación de sólidos y carbono orgánico estuvo dentro de 31,0-40,5 % para SST, 36,4-63,1 % para SSV y 48,8-55,6 % para COT. La eliminación de sólidos suspendidos también fue mayor cuando las CCM fueron inoculadas en comparación con aquellas no inoculadas (CCM-P y control). Además, se demuestra que la inoculación de CCM con lodo proporcionó el biocatalizador para la conversión de la energía química en electricidad, expresada en eficiencia culombimétrica (EC). Mientras que la EC estaba entre el 16,3 y el 16,9 % para las CCM inoculadas con lodos, la CCM-P alcanzó el 6 %.

Las tasas de remoción sugieren la importancia de la inoculación en las CCM para tratar POME. En las plantas de beneficio de palma de aceite, se requieren diferentes etapas de tratamiento de POME antes de su descarga final. Por lo tanto, las CCM proporcionan una degradación integral de POME en poco tiempo. El funcionamiento de las CCM a 1.000 mg/L de POME podría ser adecuado para degradar la materia orgánica restante del POME tratado después del sistema de lagunas que tiene una DQO de aproximadamente 1.500 mg/L , para degradar los orgánicos restantes [33].

Desempeño de la CCM a diferentes niveles de DQO

Se evaluó una carga inicial de 10.000 mg/L de DQO en las CCM. Bajo esta condición, los picos de corriente no se produjeron a lo largo de 28 días de operación. El rendimiento limitado de las CCM cargadas a 10.000 mg/L puede atribuirse a la falta de recolección de electrones por parte del ánodo. Los aceptores de electrones solubles como el nitrato y el sulfato pre-

sentes en el POME sufren una reducción a través del metabolismo metanogénico que conduce al consumo de electrones, reduciendo así la captación de corriente [34]. Además, puede haber ocurrido fermentación de gases (hidrógeno o metano) porque se observó la presurización de la cámara del ánodo después de 2 días de operación. Los estudios han demostrado que la DQO afecta el rendimiento de las CCM [35]. Por ejemplo, los gradientes de concentración de sustrato entre la biopelícula y el volumen de la solución están presentes en una cámara de ánodo no agitada, lo que limita el desarrollo de biopelícula en la superficie del ánodo. Por lo tanto, la DQO inicial debe optimizarse por debajo de 10.000 mg/L para el tratamiento de POME en esta configuración de CCM.

Aunque los 3 lodos evaluados como inóculo presentaron un rendimiento similar en términos de tratamiento de aguas residuales, el LS tuvo una potencia de salida estable a altas densidades de corriente en la prueba de polarización. Por lo tanto, el efecto de la carga orgánica inicial se evaluó utilizando LS como inóculo para las CCM con diluciones de POME de

DQO = 200, 500, 1.000 y 2000 mg/L en la cámara del ánodo. Se analizaron la generación de corriente, las curvas de polarización y la eficiencia del tratamiento de aguas residuales.

Los picos de densidad de corriente máxima se vieron afectados significativamente por la carga inicial de DQO (ANOVA, valor $p = 0,003$) y se obtuvieron valores entre 188 y 263 mA/m² para las concentraciones evaluadas (Tabla 2). Los ciclos de corriente duraron 2,9 días para 200, 4,2 días para 500, 5,6 días para 1.000 y 8,2 días para 2.000 mg/L. Como se esperaba, la CCM cargada a baja DQO tiene una degradación más rápida de POME y sus ciclos de generación de corriente fueron angostos.

Esto es explicado por Zhang *et al.* [36], que asociaron la rápida disminución de la generación de corriente con la baja concentración de DQO en la cámara del ánodo (<100 mg/L) durante los ciclos de alimentación discontinua. Esta fuerte caída de la corriente estuvo presente en todos los ciclos para todos los niveles de DQO evaluados en este estudio.

Tabla 1. Eliminación de aguas residuales y eficiencia coulombica para cada CCM inoculado con diferentes tipos de lodo, no inoculado (POME) y control estéril.

Tipo de inóculo ^a	Eficiencia de remoción				EC [%]
	DQO [%rem. ^b]	SST [%rem.]	SSV [%rem.]	COT [%rem.]	
Lodo metanogénico	66 ± 2	31 ± 10	36 ± 11	49 ± 10	16 ± 2
Lodo facultativo	70 ± 6	38,6 ± 0,3	52 ± 5	53 ± 9	16 ± 2
Lodo seco	71 ± 0	41 ± 5	63 ± 15	56 ± 2	17 ± 1
POME	60 ± 6	24 ± 17	21 ± 3	56 ± 0	6 ± 1
Control	-21 ± 9	25 ± 14	26 ± 9	29 ± 1	-5 ± 1

a. CCM inoculada con 1 mL (0,8% v/v) de lodos como inóculo a 125 ml de POME diluido a 1.000 mg/L. b. %rem.: porcentaje de remoción respecto a la concentración inicial.

Tabla 2. Resumen de las eficiencias del tratamiento de POME para CCM inoculadas con lodo seco con diferente DQO anódica inicial.

DQO inicial [mg/L]	Densidad de corriente máx. [mA/m ²]	Corriente por ciclo [mA]	Duración del ciclo [días]	DQO [%rem. ^a]	SST [%rem.]	SSV [%V]	COT [%rem.]	EC [%]
200	188 ± 71	0,188 ± 0,07	2,9 ± 0,9	35 ± 12	41 ± 4	44 ± 18	44 ± 5	62 ± 6
500	260 ± 10	0,268 ± 0,043	4,2 ± 0,6	49 ± 2	9 ± 7	26 ± 0	34 ± 0	44 ± 0
1000	263 ± 9	0,355 ± 0,041	5,6 ± 0,9	64 ± 3	35 ± 11	19 ± 1	47 ± 9	23 ± 3
2000	243 ± 9	0,312 ± 0,020	8 ± 1	61 ± 6	36 ± 5	56 ± 1	64 ± 6	7 ± 2

a % rem: porcentaje de eliminación con respecto a la concentración inicial.

Además, se recopilieron datos de polarización para determinar el potencial eléctrico máximo alcanzable para cada concentración de materia orgánica. Entre las diferentes cargas de DQO, la densidad de potencia máxima fue de $8 \pm 3 \text{ W/m}^3$ para LS-1.000 con una resistencia externa de 110Ω (Figura 3). Por lo tanto, 1.000 mg/L es la concentración más adecuada entre los niveles iniciales de DQO evaluados para la generación de energía.

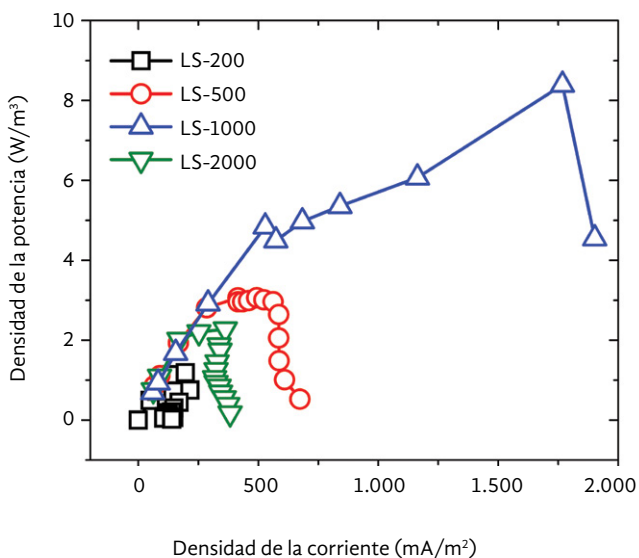
La remoción de DQO fue directamente proporcional a la DQO inicial para cargas de 200, 500 y 1.000 mg/L, logrando 35 %, 48,6 % y 63,8 %, respectivamente (Tabla 2). A pesar de que el POME diluido a 2.000 mg/L puede tener más bacterias nativas, la eliminación de la DQO se vio afectada negativamente por la sedimentación de sólidos, lo que excluyó la disponibilidad de sustrato para la biopelícula adherida al ánodo. Los sólidos suspendidos totales se midieron porque los microorganismos deberían hidrolizar los SST y después metabolizarlos como fuentes de carbono. Sin embargo, la eliminación de SST no mostró una tendencia clara y la CCM con DQO 500 mg/L tuvo una remoción pobre (valor $p = 0,007$) en comparación con el promedio de CCM cargado con otros niveles de DQO ($37 \pm 8 \%$). Con respecto a la EC, la DQO inicial mostró una relación inversa ($EC = -0,1832 \times \text{DQO inicial} + 0,7972$, $R = 0,997$). Significa que LS-200 obtuvo la mejor EC, recolectando el 62 % de los electrones

para generar corriente, mientras que el 7 % se recolectó cuando la DQO inicial aumentó a 2.000 mg/L. Esto se explica por la limitada disponibilidad del sustrato en la cámara del ánodo, ya que la concentración del inóculo fue la misma para todas las configuraciones. La eliminación de DQO fue mayor a medida que aumentaba la DQO inicial; sin embargo, la EC dio como resultado valores más bajos que pueden deberse a las pérdidas de electrones debido a los aceptores solubles en el POME concentrado, disminuyendo la recolección para generar corriente [17]. Del mismo modo, es probable que la materia orgánica sea consumida por otros microorganismos como los metanógenos fermentativos, en lugar de los electrogénicos.

Como las CCM se configuran para extraer la corriente eléctrica utilizando la mayor cantidad de materia orgánica posible, la carga de 1.000 mg/L dio como resultado una eliminación considerable de DQO, la mejor salida de potencia (Figura 3) y la corriente acumulada por ciclo (valor- $p = 0,001$).

Como se muestra en la Fig. 3, se lograron densidades de potencia más bajas en CCM a cargas de DQO bajas (200 y 500 mg/L). Por el contrario, las CCM con DQO de 1.000 mg/L tuvieron el mejor desempeño ($8,34 \text{ W/m}^3$) entre el rango evaluado (desviación estándar = $0,82 \text{ W/m}^3$). Por último, para las CCM con 2.000 mg/L, la potencia disminuyó, lo que indica que hay un valor óptimo entre 500 y 2.000 mg/L. Por lo tanto, 1.000 mg/L es una carga adecuada para operar CCM para tratar el POME.

Figura 3. Curvas de potencia para CCM inoculadas con lodo seco y cargados con POME a 200, 500, 1.000 y 2.000 mg/L de DQO.



Biopelícula en la superficie del ánodo

El fieltro de carbono se analizó antes y después de la operación de la CCM inoculada con LS a 1.000 mg/L. En la Figura 4 se observa la diferencia entre el fieltro de carbono virgen (A) y el fieltro de carbono con biopelícula (B). Comúnmente, la biopelícula está constituida por células bacterianas y los exopolisacáridos secretados. Esta matriz sirve como un entorno de comunicación entre microorganismos que permite la transmisión de señales y garantiza el desarrollo metabólico [37].

Se ha informado que especies bacterianas como *Geobacter sulfurreducens* y *Shewanella oinedensis* forman biopelículas electroactivas en el ánodo de CCM, con transporte directo de electrones al electrodo por proteínas de membrana como el citocromo de tipo C o por conexiones a través de filamentos conductores, llamados nanocables [38,39]. La formación de

biopelículas favorece la transferencia de electrones por bacterias electroquímicamente activas (BEA); sin embargo, si la matriz se vuelve gruesa, se presenta un efecto de resistencia eléctrica.

En la Figura 4-B se pueden observar diferentes morfologías celulares (oval, bastón y forma de C) dentro de la biopelícula, lo que indica la coexistencia y posible cooperación de diferentes especies en la oxidación de POME y la generación de electricidad en la CCM. Además, se observaron grumos bacterianos en la biopelícula, lo que reportes indican que contienen bacterias fermentativas que potencialmente hidrolizan sustratos complejos en simples que sirven a su vez como sustrato para bacterias electrogénicas [40]. En consecuencia, una biopelícula establecida sobre la superficie del ánodo dio como resultado la uniformidad de la generación de picos de corriente previamente graficada en la Figura 2-A. No se necesitó una re-inoculación después de reponer el medio, por lo tanto, las bacterias unidas a la superficie del ánodo durante el primer ciclo podrían mantener la biopelícula después de que el POME se recargó como medio.

Análisis de la comunidad microbiana

La microbiota del ánodo realiza reacciones de oxidación en la CCM y su composición está fuertemente relacionada con el rendimiento de la CCM a lo largo del tiempo. Los estudios que tratan el POME en las CCM se han centrado en mejorar la oxidación de la materia orgánica y la producción de energía. De esta manera, Baranitharan *et al.* sugirieron que la densidad de corriente se estabilizó en las CCM porque la comunidad microbiana se volvió más constante

con el tiempo en términos de diversidad [19]. Por lo tanto, este estudio analizó la comunidad microbiana anódica en algunas de las etapas cruciales de una operación de CCM utilizando secuenciación genómica de alto rendimiento de ARNr 16s. Se evaluaron 2 tipos de inoculación, LS (inóculo mixto) e inoculación con un cultivo puro de una bacteria electrogénica (*Shewanella* sp.).

El análisis de coordenadas principales (Figura 5) indica 2 distribuciones principales, una por cada tipo de inoculación. La comunidad microbiana anódica inicial (A) en la CCM-LS tuvo un gran cambio por el proceso de aclimatación de circuito abierto de 24 h (de A hasta el arranque) y posteriormente por la generación de corriente bajo circuito cerrado desde el arranque hasta el máximo del 1.º ciclo. La distancia entre las muestras en CCM-LS indica que, durante el proceso de aclimatación en condiciones anaeróbicas, la microbiota evolucionó hacia una comunidad más cercana al subgrupo de la comunidad asociada con la generación de corriente representada por el máximo del 1.º ciclo, el final del 1.º ciclo y el máximo del 3.º ciclo. Las distancias relativas de la comunidad sugieren una fuerte selección que finalmente favoreció el rendimiento de la CCM. Por lo tanto, la comunidad resultante en el pico de los ciclos es aquella capaz de degradar el POME y/o producir electricidad a partir de los compuestos disponibles.

Por otro lado, el grupo azul en la Figura 5 reveló que las comunidades de CCM inoculadas con *Shewanella* estaban más cerca entre sí en las diferentes etapas de la operación, lo que indica que la comunidad simplemente evolucionó ligeramente hasta el final de la operación. Esto se atribuye a la concentración

Figura 4. Micrografías electrónicas de barrido de fieltro de carbono virgen tratado (A) y biopelícula (B) después de 5 ciclos de operación de CCM en tratamiento de POME a 1.000 mg/L. Barra: 5 micrómetros (µm). Potencia: 5,0 kV.

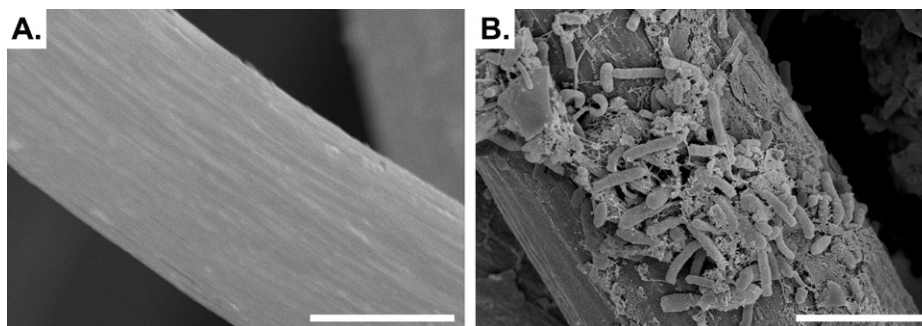
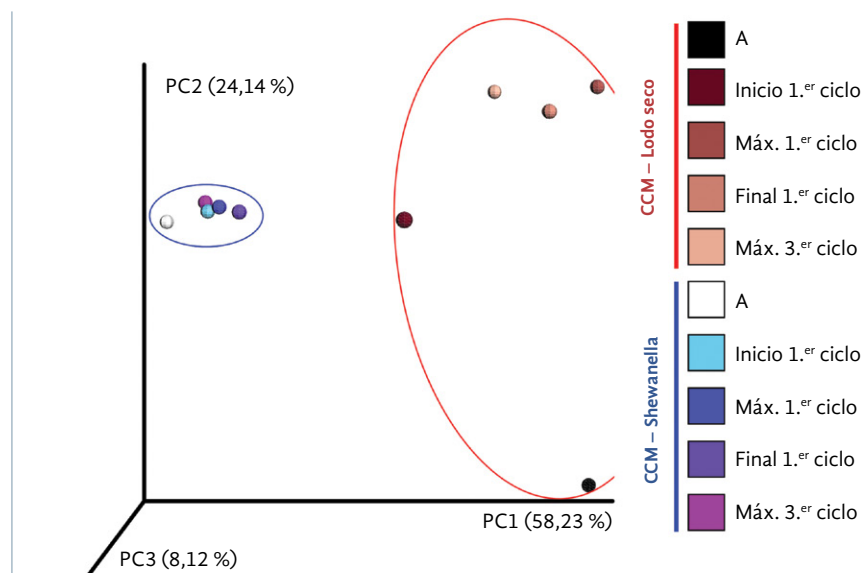


Figura 5. Beta-diversidad en comunidades bacterianas de las dos configuraciones de CCM, estimadas mediante análisis de coordenadas principales (PCoA)



de *Shewanella* sp. al inicio de la operación, que proporcionó la mayor contribución a las secuencias en la muestra. Aunque hubo variaciones en la comunidad microbiana de la biopelícula, *Shewanella* siguió dominando durante toda la operación.

Dinámica de la comunidad microbiana a través de la operación de CCM

Los índices de diversidad asociados con las muestras para cada configuración de CCM indican un comportamiento contrastante entre CCM-LS y CCM-SHE, como se muestra en la Tabla 3. Para analizar los datos de la secuencia, se obtuvieron 396.456 lecturas de alta calidad tras el filtrado de calidad de la secuencia. Los índices de diversidad α se calcularon con 26.700 lecturas de remuestreo por muestra con el objetivo de evitar el sesgo debido a los diferentes tamaños de las muestras. Se utilizaron los índices de Shannon para medir la diversidad de la comunidad microbiana en cada etapa de la generación de corriente en las CCM.

Inicialmente, la Tabla 3 muestra que la comunidad microbiana inicial en el ánodo (A) en CCM-LS fue la más diversa (índice de Shannon $H' = 3,97$), la diversidad más baja se observó en el máx. del 3.º ciclo, con un índice de Shannon de 2,15. Esto probablemente se debió al enriquecimiento selectivo de bacterias que respiran en el ánodo, primero durante la aclimatación del inóculo y luego durante todo el funcionamiento de los ciclos de la CCM. En con-

secuencia, la uniformidad (E^H) de 0,70 se presenta al inicio de CCM-LS (A) porque las especies pueden cohabitar en lodo seco y POME crudo en una abundancia relativamente pequeña. Sin embargo, la operación de CCM condujo a un enriquecimiento de bacterias anodofílicas debido al potencial del electrodo, lo que resultó en una menor uniformidad con valores de 0,54 y 0,47 en etapas posteriores (máx. del 1.º y máx. del 3.º ciclo, respectivamente).

Las Figuras 6-C y D indican la abundancia relativa bacteriana a nivel de familia asociada con las 5 etapas durante los ciclos de operación. La CCM-LS puede indicar que el comienzo de la etapa de aclimatación (LS-A) albergaba diversas familias con baja abundancia. La comunidad microbiana cambió después de la aclimatación, al inicio del primer ciclo de generación de corriente, *Pseudomonadaceae* se enriqueció de 4,2 % a 22,5 % y *Clostridiaceae* de 0,6 % a 17,1 % dominando la biopelícula del ánodo. A partir de entonces, la corriente comenzó a fluir y la conocida familia electrogénica *Geobacteraceae* apareció como la más abundante (22,8 %) en el máx. 1.º ciclo. Otras familias, tales como *Porphyromonadaceae* (17,5 %) y *Bacteroidaceae* (15,7 %) permanecieron abundantes hasta el final de la operación de la CCM. En el máx. del 3.º ciclo, *Geobacteraceae* fue la familia más abundante (29,3 %), seguida de *Bacteroidaceae* (24,1 %) y *Enterobacteriaceae* (16,8 %).

Paralelamente, la CCM-SHE se regía por un proceso de diversificación (Tabla 3). El índice de Shannon al principio (A) fue de 0,31 debido al predomi-

nio de *Shewanella* sp. como cultivo puro en el inóculo. Posteriormente, la comunidad cambió debido al crecimiento de la microbiota del POME a una comunidad más diversa con un índice de Shannon de 1,44 en el máx. del 3.º ciclo. Se puede observar que al final del 1.º ciclo, el estimador de riqueza de Chao1 (115) aumentó 2 veces desde el máx. 1.º ciclo (Chao1 = 62). Esto se atribuye a la condición de limitación de sustrato que contribuyó a la recuperación de bacterias activas no electrogénicas que utilizaron compuestos del POME y/o metabolitos producidos por los electrógenos. Sin embargo, en el máx. del 3.º ciclo, la riqueza de la comunidad bajó a 68, lo que indicó que los aumentos de corriente favorecieron solo a unas pocas familias bacterianas.

Shewanellaceaea fue la familia más abundante en cada etapa de la operación de CCM-SHE debido a su modo de inoculación. De esta manera, la uniformidad de Shannon evolucionó de 0,09 al principio a 0,42 al final de la operación de CCM-SHE. Significa que las familias tienden a alcanzar una convivencia relativa dentro de la comunidad. Finalmente, *Shewanellaceae* (51,2 %), *Lachnospiraceae* (19,8 %) y *Enterobacteriaceae* (16,4 %) fueron las familias más abundantes en el máx. del 3.º ciclo.

Estos resultados revelaron datos interesantes sobre el tipo de inoculación (inóculo mixto natural o cultivo puro). El POME no estéril fue una fuen-

te significativa de microbiota como se evidencia en la diversificación de CCM-SHE. A pesar de que la CCM-SHE se volvió más diversa, los géneros como *Geobacter* o *Bacteroides* que eran dominantes en la CCM-LS no estuvieron presentes; lo que sugiere que estos géneros son necesarios para un mejor rendimiento eléctrico utilizando POME como sustrato.

En resumen, el funcionamiento de las CCM dio como resultado un predominio de diversas BEA en comunidades microbianas. Esto se presenta ya sea mediante el enriquecimiento en el caso de CCM-LS, que va de 5 % a 48 % de BEA (Tabla 3) o proporcionando condiciones para que las BEA de otros géneros pueblen y cohabiten con un inóculo puro de BEA, como en el caso de CCM-SHE.

Desarrollo de la comunidad microbiana junto con la generación de corriente

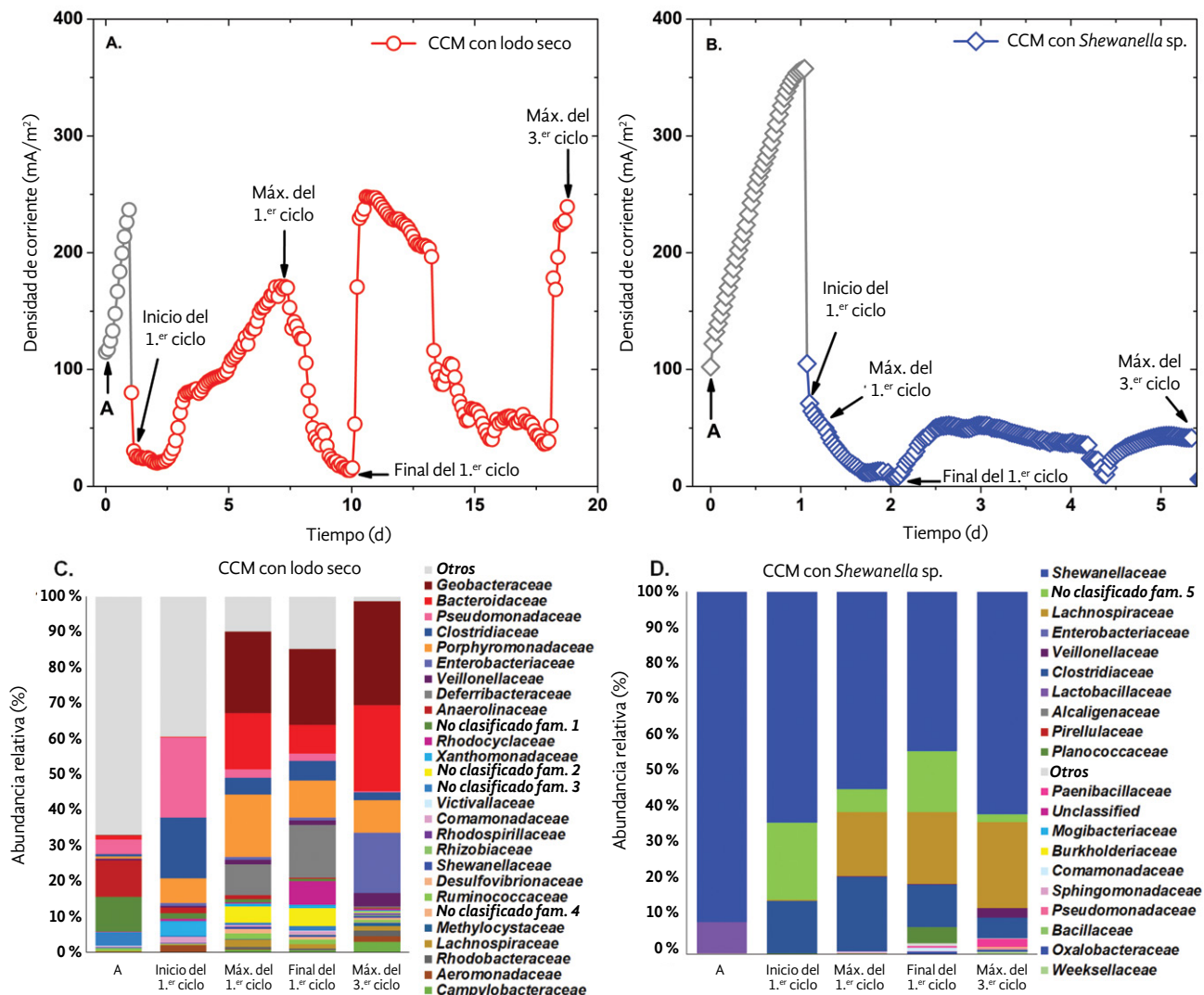
Un análisis más detallado de la funcionalidad permitió comprender la dinámica de la comunidad microbiana en la biopelícula anódica y las fases de la generación de corriente en un ciclo de CCM. Por ejemplo, la densidad de corriente en CCM-LS es mayor que en CCM-SHE, posiblemente debido a la mayor diversidad de la biopelícula. La CCM-LS en la Figura 6-A reportó una densidad de corriente máxima de 247

Tabla 3. Número de lecturas, OTU e índices de diversidad alfa para las CCM que tratan el POME inoculado con inóculo natural mixto (lodo seco) frente a bacterias electrogénicas únicas (*Shewanella* sp.).

Inóculo	Fase	No. de lecturas	Chao1	OTU	Índice Shannon (H')	Uniformidad (E ^{H'})	Géneros electrogénicos
Lodo Seco	A	54 126	1010	917	3.97	0.70	5 %
	Inicio 1.º ciclo	39 498	422	362	2.29	0.46	35 %
	Máx. 1.º ciclo	35 463	435	375	2.71	0.54	29 %
	Final 1.º ciclo	35 560	399	355	2.86	0.58	29 %
	Máx. 3.º ciclo	36 509	263	223	2.15	0.47	48 %
<i>Shewanella</i> sp.	A	32 762	67	36	0.31	0.09	91 % (she =91 %)ª
	Inicio 1.º ciclo	51 691	39	25	0.94	0.28	78 % (she=63 %)
	Máx. 1.º ciclo	26 769	62	49	1.20	0.37	75 % (she=54 %)
	Final 1.º ciclo	37 820	115	101	1.54	0.38	56 % (she=44 %)
	Máx. 3.º ciclo	46 258	68	45	1.44	0.42	72 % (she = 51 %)

a “She=”: Porcentaje de *Shewanella* entre los géneros electrogénicos de la muestra

Figura 6. Curvas de corriente y puntos de muestreo para (A) CCM con lodo seco y (B) CCM con *Shewanella* sp. durante 3 ciclos de funcionamiento para el tratamiento de POME no estéril a DQO de 1.000 mg/l. Abundancia relativa de microbiota a nivel de familia para (C) CCM lodo seco y (D) CCM *Shewanella* sp. en cada etapa de la generación de corriente.



mA/m², 4,75 veces mayor que la corriente producida por *Shewanella* sp. (52 mA/m²).

Las curvas de corriente mostraron una gran diferencia entre los dos métodos de inoculación. Los ciclos de CCM-LS fueron de 7 a 10 días; mientras tanto, los ciclos de CCM-SHE duraron menos de 3 días una vez que se reemplazó el POME fresco en la cámara del ánodo. Por lo tanto, la inoculación con el inóculo mixto natural (LS) fue mejor en términos

de generación de corriente que la inoculación con un cultivo puro de BEA (*Shewanella*).

La microbiota CCM-LS inicial en el ánodo antes de la fase de aclimatación (A) tuvo una baja abundancia de géneros individuales, con predominancia de *Metanosaeta* acetoclástica (8,3%) y *Pseudomonas* (4,0 %). Las especies de *Pseudomonas* se encuentran comúnmente en los lodos de aguas residuales [23], en los que la materia orgánica se degrada hasta que

Methanosaeta produce metano [41]. Después de la aclimatación, una *Exiguobacteriaceae* no clasificada (30,0 %) y *Pseudomonas* (22,4 %) poblaron la biopelícula anódica, lo que indica que esas bacterias fueron beneficiadas por la exposición al POME en condiciones anaeróbicas en circuito abierto. Por lo tanto, esta fue la población inicial para el primer ciclo de generación. A partir de entonces, la comunidad microbiana tuvo un cambio crucial para promover la actividad electrogénica. El máx. del 1.º ciclo mostró un predominio de *Geobacter* (22,9 %) seguido de una *Porphyromonadaceae* no clasificada 1 (16,1 %) y *Bacteroides* (15,2 %). Una biopelícula cooperativa se unió al ánodo durante el primer ciclo de generación. *Porphyromonadaceae* y *Bacteroides* son bacterias fermentativas que sirvieron como facilitadoras al degradar compuestos complejos y producir acetato disponible para los electroógenos. Esto indica que el tratamiento óptimo de las aguas residuales en las

CCM depende del desarrollo de múltiples especies, no solo electrogénicas en la biopelícula como se sugirió anteriormente [42]. Además, la disminución electrogénica se detecta al final del primer ciclo de CCM-LS atribuido a un periodo de limitación en el que se consume el sustrato disponible para los electroógenos, lo que conduce a la proliferación de bacterias con otros tipos de metabolismos. Sin embargo, después de 3 ciclos de operación *Geobacter* y *Bacteroides* permanecieron dominantes (29,3 % y 24,1 %, respectivamente), lo que indica que la generación de corriente de 247 mA/m² estaba directamente relacionada con su presencia. Las familias dominantes en el máx. del 3.º ciclo en CCM-LS explican cómo el POME se puede convertir en electricidad. Los géneros *Porphyromonadaceae* generalmente participan en la degradación anaeróbica de complejos como carbohidratos, proteínas y péptidos para producir ácidos grasos volátiles [43]. Mientras tanto, *Bacteroides* es

Tabla 4. Abundancia relativa (porcentaje) de los géneros más relevantes en las etapas de operación de las CCM

CCM-LS					
Género	A	Inicio 1.º ciclo	Máx. 1.º ciclo	Final 1.º ciclo	Máx. 3.º ciclo
<i>Geobacter</i>	0,1	0,0	22,9	21,4	29,3
<i>Bacteroides</i>	0,3	0,0	15,2	7,2	24,0
<i>Escherichia</i>	0,0	0,5	0,5	0,3	14,8
<i>Porphyromonadaceae</i> no clasificado	0,5	7,0	16,1	8,9	9,0
<i>Clostridium</i>	0,5	9,1	1,3	3,4	1,6
<i>Pseudomonas</i>	4,0	22,4	1,7	1,5	0,2
<i>Deferribacteraceae</i> no clasificado	0,0	0,0	8,3	13,3	0,2
<i>Methanosaeta</i>	8,3	0,2	0,4	0,1	0,0
<i>Exiguobacteraceae</i> no clasificado	0,0	30,0	2,8	5,9	0,0
CCM-SHE					
Género	A	Inicio 1.º ciclo	Máx. 1.º ciclo	Final 1.º ciclo	Máx. 3.º ciclo
<i>Shewanella</i>	91,1	63,8	54,5	44,0	51,3
<i>Lachnospiraceae</i> no clasificado	0,0	0,4	17,5	18,2	19,8
<i>Trabulsiella</i>	0,0	0,0	0,0	0,0	16,3
<i>Clostridium</i>	0,0	14,4	20,6	11,7	4,7
<i>Clostridiales</i> no clasificado	0,0	21,1	6,4	16,8	1,9
<i>Lactobacillus</i>	8,7	0,0	0,1	0,0	0,1

un productor de acetato a través de la fermentación de polisacáridos [44] e incluso es capaz de transferir electrones que reducen el Fe(III) [45]. Por lo tanto, el conocido género electrogénico *Geobacter* aprovecha los productos de otros metabolismos y oxida el acetato como donante de electrones y reduce el electrodo como aceptor de electrones [46]. Además, *Escherichia* (14,8 %) es conocida por su capacidad para fermentar muchas fuentes de carbono y algunas de sus especies se han utilizado como inóculo en estudios previos de CCM que muestran la actividad de transferencia de electrones [47]. Otro aspecto importante es el gradiente de diversidad entre el anolito (POME diluido) y el inóculo. Según Mallon *et al.* [48], la diversidad es un actor clave para establecer una invasión microbiana en un entorno de huésped. El LS proporcionó varios géneros a la cámara del ánodo por inoculación; por lo tanto, una comunidad uniforme y diversa comenzó a interactuar. Las condiciones de operación de CCM condujeron a una disimilitud funcional en la comunidad que se reflejó en la curva de densidad de corriente (Figura 6-A) por la posible capacidad de usar diferentes tipos de moléculas presentes en el POME. Finalmente, el reemplazo del anolito en cada ciclo sirvió como un impulso promotor para la nueva estructura de la comunidad al proporcionar recursos nuevos y suficientes para seguir funcionando.

Por otro lado, la CCM-SHE exhibió una generación de corriente más baja. Aunque *Shewanella* se ha considerado la bacteria de respiración más versátil hasta la fecha [49], parecía que la complejidad del POME limitaba su rendimiento. Inicialmente, *Shewanella* comprendía la mayor parte de la microbiota inicial (91 %) antes de la aclimatación (A), debido al método de inoculación (Tabla 4). Luego, la biopelícula de arranque del primer ciclo mostró una población considerable de *Clostridiales no clasificados* (21,2 %) y *Clostridium* (14,4 %) junto con una abundancia relativa reducida de *Shewanella* (63,8 %). Indica que la microbiota nativa presente en el POME fue enriquecida en condiciones anaeróbicas en circuito abierto. Una vez que la corriente comenzó a transferirse entre los electrodos, *Shewanella* todavía estaba sufriendo un despliegue en abundancia relativa hasta el máx. del 1.º ciclo (54,1 %). En este punto del proceso, otros géneros aparecieron como importantes contribuyentes al rendimiento de la CCM.

Por ejemplo, *Lachnospiraceae Unclassified* y *Clostridium* aumentaron en el pico de corriente máxima en el 1.º ciclo (17,5 % y 20,6 %, respectivamente).

Las familias *Lachnospiraceae* y *Clostridiaceae* están relacionadas con la degradación lignocelulósica de los racimos de fruta vacíos de palma de aceite para producir biogás [50]; los resultados de este estudio indican que estos géneros también son capaces de degradar el POME. Finalmente, *Shewanella* mantuvo una población estable (51,3 %) y fue acompañada por *Lachnospiraceae* no clasificada (19,8 %) y *Trabulsiella* (16,3 %), al final del 3.º ciclo. Los ciclos de generación de corriente fueron similares en forma y duración, lo que significa que se estableció una biopelícula fuerte en la superficie del ánodo. Aunque la generación de corriente está asociada con los géneros electrogénicos, no se puede ignorar la contribución de las bacterias fermentativas. Posiblemente, los metabolismos de *Trabulsiella*, *Lachnospiraceae* no clasificado y *Clostridium* proporcionaron compuestos accesibles a *Shewanella*, lo que le permitió llevar a cabo su trabajo. Se puede decir que la generación de electricidad en CCM cargada con un sustrato tan complejo es un proceso complementario que requiere la interacción de varios géneros para lograr la degradación.

La inoculación externa puede explicarse por los fundamentos de las invasiones microbianas descritos por Mallon *et al.* [48]. Se añadieron intencionalmente inóculos de LS o SHE a la comunidad nativa en el POME y se sometieron a un proceso de invasión microbiana; introducción, establecimiento, crecimiento y propagación, e impacto final [48]. Por ejemplo, LS y *Shewanella* eludieron la resistencia abiótica (pH, temperatura, salinidad adecuada para crecer) a través de una introducción de población viable y condiciones de la CCM. Sin embargo, la resistencia biótica entró en juego a través de la competencia del sustrato o el antagonismo. Esto fue crucial en el caso de *Shewanella* ya que la microbiota residente con recursos limitados redujo la abundancia de la población de *Shewanella* a 51,3 % a pesar de tener una abundancia inicial de 91,1 %. Al mismo tiempo, algunos otros géneros aumentaron su abundancia posiblemente debido a nuevas interacciones que finalmente afectan el rendimiento de la CCM que se reflejó en la curva de corriente en la Figura 6-B.

Conclusiones

Los LM, LF y LS influyeron positivamente en el rendimiento de CCM en términos de remoción de DQO ($69,2 \pm 2,1$ %) y EC ($16,3 \pm 0,6$ %), en comparación con los no inoculados (remoción de DQO $59,6 \pm 6,2$ % y EC de $6,0 \pm 1,2$ %). Esto indica la importancia

de un inóculo externo para optimizar el tratamiento de POME y la recolección de energía.

La potencia de salida del LS se mantuvo estable en su máximo ($3,3 \pm 0,4 \text{ W/m}^3$) a una alta demanda de corriente. Esto se asocia con el diverso microbioma suministrado por el LS que contribuye a la degradación de POME y la generación de electricidad.

La carga inicial de la DQO afectó el proceso electroquímico y de tratamiento de aguas residuales en las CCM. Sin embargo, solo la EC presentó una correlación clara entre las cargas evaluadas ($EC = -0,1832 \text{ DQO inicial} + 0,7972$).

Las CCM condujeron a un equilibrio en términos de diversidad, donde la colaboración entre bacterias fermentativas y electrogénicas permitió la degradación de POME y la generación de electricidad al mismo tiempo. La comunidad microbiana se enriqueció cuando se inoculó la CCM con LS (consorcio natural), mientras que una diversificación se presentó por inoculación con *Shewanella* (cultivo puro). *Shewanella* se mantuvo como el género más dominante para las CCM inoculadas con cultivo puro, pero se obtuvieron densidades de corriente ~5 veces menores en comparación con las CCM inoculadas con el consorcio natural de LS.

Declaración de conflicto de intereses

Los autores declaran que no tienen intereses financieros contrapuestos conocidos ni relaciones perso-

nales que pudieran haber influido en el trabajo que se presenta en este documento.

Reconocimientos

Esta investigación fue apoyada por la Universidad Industrial de Santander-UIS [Proyecto VIE 5487]. J.A. Albarracín-Arias agradece a COLCIENCIAS por la beca bajo el programa “Maestría Nacional” N° 771. Los autores agradecen al Dr. Nurul Asyifah Mustapha por su asistencia técnica con el análisis de secuenciación de ADN.

Apéndice A. Datos complementarios

Los datos complementarios a este artículo se pueden encontrar en línea en <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.08.218>

Fuente de figuras

Figuras 1, 2, 3, 4, 5 y 6. Fuente: Reimpreso de International Journal of Hydrogen Energy, Volumen 46, número 74, Albarracín-Arias, J. A., Yu C. P., Y., Toshinari, M., Valdivieso-Quintero, W. & Sánchez-Torres, V. Microbial Community Dynamics and Electricity Generation in MFCs Inoculated with POME Sludges and Pure Electrogenic Culture, 14 páginas, Copyright (2022), con permiso de Elsevier.

Referencias

1. Tan H, Li J, He M, Li J, Zhi D, Qin F, *et al.* Global evolution of research on green energy and environmental technologies: A bibliometric study. J Environ Manag 2021;297:301e4797. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113382>.
2. Li Q, Zuo W, Zhang Y, Li J, He Z. Effects of rectangular rib on exergy efficiency of a hydrogen-fueled micro combustor. Int J Hydrogen Energy 2020;45:10155e63. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.01.221>
3. Zuo W, Li Q, He Z, Li Y. Numerical investigations on thermal performance enhancement of hydrogen-fueled micro planar combustors with injectors for micro-thermophotovoltaic applications. Energy 2020;194:116904. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.116904>

4. Wang Z, Zhang X, Rezazadeh A. Hydrogen fuel and electricity generation from a new hybrid energy system based on wind and solar energies and alkaline fuel cell. *Energy Rep* 2021;7:2594e604. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.04.060>
5. Rasheed T, Anwar MT, Ahmad N, Sher F, Khan SUD, Ahmad A, *et al.* Valorisation and emerging perspective of biomass based waste-to-energy technologies and their socioenvironmental impact: a review. *J Environ Manag* 2021;287:112257. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2021.112257>.
6. Liebetrau J, Strauber H, Kretzschmar J, Denysenko V, Nelles M. Anaerobic digestion. *Adv Biochem Eng Biotechnol* 2017;166:281e99. https://doi.org/10.1007/10_2016_67
7. Ghosh S, Chowdhury R, Bhattacharya P. A review on single stage integrated dark-photo fermentative biohydrogen production: insight into salient strategies and scopes. *Int J Hydrogen Energy* 2018;43:2091e107. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.12.018>.
8. Logan BE. Microbial fuel cells. 2008. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>. Hoboken.
9. ElMekawy A, Srikanth S, Bajracharya S, Hegab HM, Nigam PS, Singh A, *et al.* Food and agricultural wastes as substrates for bioelectrochemical system (BES): the synchronized recovery of sustainable energy and waste treatment. *Food Res Int* 2015;73:213e25. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.11.045>
10. Asefi Bahareh, Li S-L, Moreno HA, Sánchez-Torres V, Hu A, Li J, *et al.* Characterization of electricity production and microbial community of food waste-fed microbial fuel cells. *Process Saf Environ Protect* 2019;125:83e91.
11. Wilberforce T, Sayed ET, Abdelkareem MA, Elsaid K, Olabi AG. Value added products from wastewater using bioelectrochemical systems: current trends and perspectives. *J Water Process Eng* 2021;39:101737. <https://doi.org/10.1016/J.JWPE.2020.101737>
12. Munoz-Cupa C, Hu Y, Xu C, Bassi A. An overview of microbial fuel cell usage in wastewater treatment, resource recovery and energy production. *Sci Total Environ* 2021;754:142429. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142429>
13. Hosseini SE, Bagheri G, Abdul Wahid M, Saat A. Clean fuel, clean energy conversion technology: experimental and numerical investigation of palm oil mill effluent biogas flameless combustion. *BioResources* 2015;10:6597e609. <https://doi.org/10.15376/biores.10.4.6597-6609>
14. Liew WL, Kassim MA, Muda K, Loh SK, Affam AC. Conventional methods and emerging wastewater polishing technologies for palm oil mill effluent treatment: a review. *J Environ Manag* 2014;149:222e35. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.10.016>
15. Cheng YW, Chong CC, Lam MK, Ayoub M, Cheng CK, Lim JW, *et al.* Holistic process evaluation of non-conventional palm oil mill effluent (POME) treatment technologies: a conceptual and comparative review. *J Hazard Mater* 2021;409:124964. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124964>

16. Cheng J, Zhu X, Ni J, Borthwick A. Palm oil mill effluent treatment using a two-stage microbial fuel cells system integrated with immobilized biological aerated filters. *Bioresour Technol* 2010;101:2729e34. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.12.017>
17. Baranitharan E, Khan MR, Prasad DMR, Salihon J Bin. Bioelectricity generation from palm oil mill effluent in microbial fuel cell using polacrylonitrile carbon felt as electrode. *Water, Air, Soil Pollut* 2013;224:1533. <https://doi.org/10.1007/s11270-013-1533-1>
18. Jong BC, Liew PWY, Juri ML, Kim BH, Mohd, Dzomir AZ, Leo KW, *et al.* Performance and microbial diversity of palm oil mill effluent microbial fuel cell. *Lett Appl Microbiol* 2011;53:660e7. <https://doi.org/10.1111/j.1472765X.2011.03159.x>.
19. Baranitharan E, Khan MR, Prasad DMR, Teo WFA, Tan GYA, Jose R. Effect of biofilm formation on the performance of microbial fuel cell for the treatment of palm oil mill effluent. *Bioproc Biosyst Eng* 2015;38:15e24. <https://doi.org/10.1007/s00449-014-1239-9>
20. Yu J, Park Y, Cho H, Chun J, Seon J, Cho S, *et al.* Variations of electron flux and microbial community in air-cathode microbial fuel cells fed with different substrates. *Water Sci Technol* 2012;66:748e53. <https://doi.org/10.2166/wst.2012.240>
21. Logan BE, Hamelers B, Rozendal R, Schroder U, Keller J, Freguia S, *et al.* Microbial fuel cells: methodology and technology. *Environ Sci Technol* 2006;40:5181e92. <https://doi.org/10.1021/es0605016>
22. Md Nor MH, MuhammadMubarak MF, Abdirahman Elmi HS, Ibrahim N, Abdul Wahab MF, Ibrahim Z. Bioelectricity generation in microbial fuel cell using natural microflora and isolated pure culture bacteria from anaerobic palm oil mill effluent sludge. *Bioresour Technol* 2015;190:458e65. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.02.103>
23. Baranitharan E, Khan MR, Yousuf A, Teo WFA, Tan GYA, Cheng CK. Enhanced power generation using controlled inoculum from palm oil mill effluent fed microbial fuel cell. *Fuel* 2015;143:72e9. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.11.030>.
24. Islam MA, Woon CW, Ethiraj B, Cheng CK, Yousuf A, Khan MMR. Correlation of power generation with timecourse biofilm architecture using *Klebsiella variicola* in dual chamber microbial fuel cell. *Int J Hydrogen Energy* 2017;42:25933e41. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.08.193>
25. Islam MA, Woon CW, Ethiraj B, Yousuf A, Ong HR, Khan MMR. Bioelectrochemical behavior of wild type *Bacillus cereus* in dual chamber microbial fuel cell. *IJUM Eng J* 2017;18:79e86
26. Cai H, Wang J, Bu Y, Zhong Q. Treatment of carbon cloth anodes for improving power generation in a dual-chamber microbial fuel cell. *J Chem Technol Biotechnol* 2013;88:623e8. <https://doi.org/10.1002/jctb.3875>
27. Klindworth A, Pruesse E, Schweer T, Peplies J, Quast C, Horn M, *et al.* Evaluation of general 16S ribosomal RNA gene PCR primers for classical and next-generation sequencing-based diversity studies. *Nucleic Acids Res* 2013;41:1e11. <https://doi.org/10.1093/nar/gks808>

28. Caporaso JG, Kuczynski J, Stombaugh J, Bittinger K, Bushman FD, Costello EK, *et al.* QIIME allows analysis of high-throughput community sequencing data. *Nat Methods* 2010;7:335e6. <https://doi.org/10.1038/nmeth.f.303>
29. Logan BE, Hamelers B, Rozendal R, Schroder U, Keller J, Freguia S, *et al.* Microbial fuel cells: methodology and technology. *Environ Sci Technol* 2006;40:5181e92. <https://doi.org/10.1021/es0605016>
30. Chang CC, Li SL, Hu A, Yu CP. Long-term operation of biocatalyzed cathodes within continuous flow membrane-less microbial fuel cells. *Chemosphere* 2021;266:129059. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129059>
31. Watson VJ, Logan BE. Analysis of polarization methods for elimination of power overshoot in microbial fuel cells. *Electrochem Commun* 2011;13:54e6. <https://doi.org/10.1016/J.ELECOM.2010.11.011>.
32. Ieropoulos I, Winfield J, Greenman J. Effects of flow-rate, inoculum and time on the internal resistance of microbial fuel cells. *Bioresour Technol* 2010;101:3520e5. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.12.108>
33. Althausen M. Tratamiento de efluentes de la planta de beneficio-convertir un residuo en un recurso. *Palmas* 2016;37:31e7.
34. Lu N, Zhou S gui, Zhuang L, Zhang J tao, Ni J ren. Electricity generation from starch processing wastewater using microbial fuel cell technology. *Biochem Eng J* 2009;43:246e51. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2008.10.005>
35. Lin CW, Wu CH, Huang WT, Tsai SL. Evaluation of different cell-immobilization strategies for simultaneous distillery wastewater treatment and electricity generation in microbial fuel cells. *Fuel* 2015;144:1e8. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.12.009>
36. Zhang X, He W, Ren L, Stager J, Evans PJ, Logan BE. COD removal characteristics in air-cathode microbial fuel cells. *Bioresour Technol* 2015;176:23e31. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.11.001>
37. Veerubhotla R, Varanasi JL, Das D. Biofilm formation within microbial fuel cells. En: *Prog. Recent trends microb. Fuel cells.* Elsevier B.V.; 2018. p. 231e42. <https://doi.org/10.1016/B978-0444-64017-8.00012-9>
38. Bonanni PS, Massazza D, Busalmen JP. Stepping stones in the electron transport from cells to electrodes in *Geobacter sulfurreducens* biofilms. *Phys Chem Chem Phys* 2013;15:10300. <https://doi.org/10.1039/c3cp50411e>
39. Kumar R, Singh L, Zularisam AW. Exoelectrogens: recent advances in molecular drivers involved in extracellular electron transfer and strategies used to improve it for microbial fuel cell applications. *Renew Sustain Energy Rev* 2016;56:1322e36. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.029>
40. In-Seop C, Hyun-Soo M, Orianna B, Jae-Kyung J, Ho-Il P, Byung-Hong K. Electrochemically active bacteria (EAB) and mediator-less microbial fuel cells. *J Microbiol Biotechnol* 2006;16:163e77.

41. Patel GB. *Methanosaeta*. En: Bergey's Manual of systematics of archaea and bacteria. Wiley; 2015. p. 1e8.
42. Wang VB, Yam JKH, Chua SL, Zhang Q, Cao B, Chye JLS, *et al.* Synergistic microbial consortium for bioenergy generation from complex natural energy sources. *Sci World J* 2014;2014. <https://doi.org/10.1155/2014/139653>.
43. Krieg NR. *Porphyromonadaceae* fam. nov. En: Bergey's Manual of Systematics of Archaea and Bacteria. Wiley; 2015. p. 1e2.
44. Shah AL, Liu C, Hwy RH, Finegold SM, Medical VA, F IDS, *et al.* *Bacteroides*. En: Bergey's Manual of Systematics of Archaea and Bacteria. Wiley; 2015.
45. Wang A, Liu L, Sun D, Ren N, Lee D-J. Isolation of Fe(III)reducing fermentative bacterium *Bacteroides* sp. W7 in the anode suspension of a microbial electrolysis cell (MEC). *Int J Hydrogen Energy* 2010;35:3178e82. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.12.154>
46. Bond DR, Lovley DR. Electricity production by *Geobacter sulfurreducens* attached to electrodes. *Appl Environ Microbiol* 2003;69:1548e55. <https://doi.org/10.1128/AEM.69.3.1548>
47. Rezaei F, Xing D, Wagner R, Regan JM, Richard TL, Logan BE. Simultaneous cellulose degradation and electricity production by *Enterobacter cloacae* in a microbial fuel cell. *Appl Environ Microbiol* 2009;75:3673e8. <https://doi.org/10.1128/AEM.02600-08>
48. Mallon CA, Van Elsas JD, Salles JF. Microbial invasions: the process, patterns, and mechanisms. *Trends Microbiol* 2015;23:719e29. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2015.07.013>
49. Raghavulu SV, Babu PS, Goud RK, Subhash GV, Srikanth S, Mohan SV. Bioaugmentation of an electrochemically active strain to enhance the electron discharge of mixed culture: process evaluation through electro-kinetic analysis. *RSC Adv* 2012;2:677e88. <https://doi.org/10.1039/c1ra00540e>
50. Suksong W, Kongjan P, Prasertsan P, O-Thong S. Thermotolerant cellulolytic *Clostridiaceae* and *Lachnospiraceae* rich consortium enhanced biogas production from oil palm empty fruit bunches by solidstate anaerobic digestion. *Bioresour Technol* 2019;291:121851. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121851>
51. Mustapha Nurul Asyifah, Hu Anyi, Chang-Ping Yu, Sharuddin Siti Suhailah, Ramli Norhayati, Shirai Yoshihito, *et al.* Seeking key microorganisms for enhancing methane production in anaerobic digestion of waste sewage sludge. *Environmental biotechnology* 2018;102:5323e34. <https://doi.org/10.1007/s00253-018-9003-8>.

Hacia el aprovechamiento energético de los raquis de palma en calderas de biomasa*

Towards the Energy Utilization of Palm Empty Fruit Bunch in Biomass Boilers

<https://doi.org/10.56866/01212923.13806>

CITACIÓN: Bayona-Roa, C., García-Navarro, J. G., Gacha, J. & Ricaurte, H. (2023). Hacia el aprovechamiento energético de los raquis de palma en calderas de biomasa. *Palmas*, 44(1), 51-64.

PALABRAS CLAVE: Calderas de biomasa, Combustión, Raquis de palma, Corrosión.

KEY WORDS: Boiler, Combustion, Palm Oil Empty Fruit Bunch, Corrosion

RECIBIDO: junio de 2022.

APROBADO: enero de 2023.

* Artículo de investigación e innovación científica y tecnológica.

BAYONA-ROA, CAMILO

Centro de Ingeniería Avanzada,
Investigación y Desarrollo (CIAID),
Bogotá, Colombia.

Autor para correspondencia:
cbayona@ciaid.co

GARCÍA-NAVARRO, JUAN GUILLERMO

Centro de Ingeniería Avanzada,
Investigación y Desarrollo (CIAID),
Bogotá, Colombia.

GACHA, JEISSON

VR Ingeniería, Bogotá, Colombia.

RICAUORTE, HÉCTOR

VR Ingeniería, Bogotá, Colombia

Resumen

Quemar raquis de palma (también llamado tusa) en las calderas de biomasa trae consigo la superación de distintos problemas tecnológicos asociados a ese biocombustible. En particular, el alto contenido de potasio, fósforo y cloro son elementos potencialmente perjudiciales por la corrosión que generan en las superficies de transferencia de calor. En este artículo se discute cómo superar las problemáticas tecnológicas para que las calderas generadoras de vapor y

electricidad en plantas de beneficio de aceite de palma puedan operar quemando raquis que anteriormente no se usaba en la generación de energía en la industria. Estas consideraciones, aunque técnicas, se orientan a mejorar la sostenibilidad y la competitividad de la agroindustria de la palma de aceite.

Abstract

Burning palm oil empty fruit bunches in biomass boilers involves overcoming several technological problems. In particular, the high content of potassium, phosphorus and chlorine are potentially harmful elements due to the corrosion they generate on heat transfer surfaces. This article discusses how to overcome the technological problems so that steam and electricity in palm oil processing plants can be produced from burning stems that were previously not used in energy generation in the industry. These considerations, although technical, are aimed to improve the sustainability and competitiveness of the palm oil agro-industry.

Introducción

Entre las plantaciones más atractivas en la región para la generación de energía a partir de la biomasa se encuentra la palma de aceite, que es el segundo cultivo más importante en términos de extensión en Colombia. Durante 2021, el país contó con una producción de aceite de palma crudo (APC) de 1.747.377 t (Fedepalma, 2022). Un incremento proporcional ocurrió en la producción de residuos generados en el proceso de extracción y beneficio del aceite, entre ellos, las tusas o raquis (20 %), la fibra del fruto (13 %), el cuesco o cáscara de las almendras (7 %), así como las cenizas producidas por las calderas de biomasa que operan en las plantas de beneficio (García-Núñez *et al.*, 2006). Estos residuos representan entre el 70-74 % de la biomasa de la palma procesada (Pérez y Lopez, 2019). Aparte del aprovechamiento energético de la fibra y cuesco como combustibles en las calderas para producción de vapor y electricidad, los raquis se consideran residuos y, en contadas ocasiones, un elemento para mejorar el suelo en las plantaciones o como materia prima para la producción de fertilizantes. Sin embargo, el uso convencional que se le ha dado como acondicionador del suelo no es muy atractivo debido al alto costo de su transporte (García-Núñez *et al.*, 2006).

En aras de mejorar el aprovechamiento de los subproductos del proceso de la palma de aceite, la industria ha buscado utilizar los raquis como materia prima de otros procesos. Desde el siglo pasado se ha planteado la posibilidad de usarlos para otras aplica-

ciones como la producción de biocombustibles y la de pulpa de papel de celulosa, entre otros (Van Dam, 2016). Distintos procedimientos y tecnologías de conversión termoquímica se han intentado y explicado en mucha literatura para lograr su aprovechamiento energético, algunas de estas son la pirólisis, el desmenuzado químico y la conversión hidrotérmica. Sin embargo, pocas alternativas son tan factibles económicamente como la combustión en calderas de biomasa para la operación de las plantas de beneficio (Chiew y Shimada, 2013; Serrano, 1995). De esa manera se incrementaría en 29 % la energía aprovechada por la industria de la palma de aceite, como se demuestra en la Tabla 1. En esta, se presentan las toneladas y el potencial energético anualizado para los tres tipos de combustibles (raquis, fibra y cuesco de palma). Adicionalmente, se ha explicado (Serrano, 1995) la posibilidad de obtener una rentabilidad mayor de la palma de aceite si el raquis reemplazara la fibra como combustible principal de las calderas, y la fibra se aprovechara solamente en la producción de concentrados para la alimentación de bovinos y porcinos. De esta manera es posible usar al máximo, inclusive completamente, los residuos generados en la cadena de producción del aceite de palma. Esto permitiría una producción más limpia y favorable con el medio ambiente, siendo biomasa renovable y carbono neutral debido a su corto tiempo de regeneración, es decir, que incorpora con relativa rapidez en las plantaciones el dióxido de carbono producido en la combustión. A nivel general esto se traduce en el desarrollo sustentable y energéticamente eficiente.

Tabla 1. Incremento energético, incluyendo el raquis de palma de aceite en la combustión de calderas (basado en Van Dam, (2016)).

	Toneladas anuales de residuos	Potencial energético (GJ)
Raquis	646.529	11.799.163
Fibra de palma	716.425	14.113.564
Cuesco de palma	463.055	15.044.916
Total energía sin raquis		29.158.480
Total energía con raquis		40.957.643
Porcentaje de incremento energético quemando el raquis en las calderas de biomasa		28,81 %

Cálculos basados en la producción colombiana de 2021, según (Fedepalma, 2022).

Para aprovechar energéticamente los raquis de la palma de aceite, se deben superar algunas limitaciones tecnológicas que se presentan en las calderas de biomasa. En comparación con los combustibles fósiles, el raquis posee un contenido energético importante relacionado con su composición de oxígeno e hidrógeno. Sin embargo, cuenta también con altos contenidos de metales alcalinos como el potasio (K) y el sodio (Na), y no metálicos como el fósforo (P), además de cloro (Cl), que son problemáticos en contacto con los elementos mecánicos de calderas y otros equipos térmicos (Pérez y López, 2019). Particularmente, esa composición química tiende a formar depósitos de ceniza dentro de la caldera y así, causa una disminución en la transferencia de calor, pero especialmente corrosión, erosión y abrasión de los componentes metálicos. La gran cantidad de minerales alcalinos presentes en el raquis disminuye el punto de fusión de las cenizas y aumenta su potencial corrosivo en componentes de la caldera fundamentales para la transferencia y el aprovechamiento de la energía del combustible.

Solucionar este problema tecnológico es trascendental para el sector de la palma de aceite en Colombia, pero también para países tropicales (García-Núñez *et al.*, 2006), pues su agroindustria tiene como denominador común una baja inversión en proyectos de investigación y desarrollo, lo cual repercute en la poca apropiación de soluciones particulares; a excepción de Tailandia y Malasia (Madhiyanon

et al., 2012; Ngamsidhiphongs *et al.*, 2021; Srasri *et al.*, 2022), donde se ha presentado el desarrollo de tecnologías para el aprovechamiento energético de raquis de palma, enmarcados, por ejemplo, dentro de The Malaysian Palm Oil Board (MPOB) (Loh, 2017; Taishan Group, 2017).

Trabajos similares para la combustión de madera o residuos urbanos se han abordado en países desarrollados. Los documentos publicados en Galindo-García *et al.* (2012) y Nielsen *et al.* (2000) demuestran la posibilidad de superar problemáticas similares. En Colombia se han realizado algunos estudios para evaluar el desempeño de calderas que funcionan con biomasa, como es el caso de Carvajal Díaz (2018) o de Albarracín-Becerra *et al.* (2019) en los que se diseña un sistema de cocombustión entre biomasa (palma de aceite) y biogás en una caldera. Sin embargo, hay una literatura limitada en el campo del rediseño de calderas de biomasa en el país, en la que se destacan el diseño del sistema de distribución de aire para la combustión de bagazo de caña de azúcar en una caldera (Villamil Franco y Cuartas Ramos, 2017) o el diseño experimental de un prototipo de caldera (Betancourt Prisco y Ospina Berrío, 2010). Aún no se han publicado estudios técnicos con argumentación cuantitativa (Bayona, 2011) sobre la evaluación de la forma del hogar de combustión, ni de las condiciones de operación de la combustión (Hernández *et al.*, 2018). La baja implementación de este tipo de proyectos se debe en gran parte a la réplica

de las técnicas de diseño y fabricación tradicionales y al desconocimiento por parte de los inversionistas de los beneficios técnicos, ambientales, económicos y fiscales en cuanto al diseño y fabricación de equipos térmicos propios para la agroindustria local.

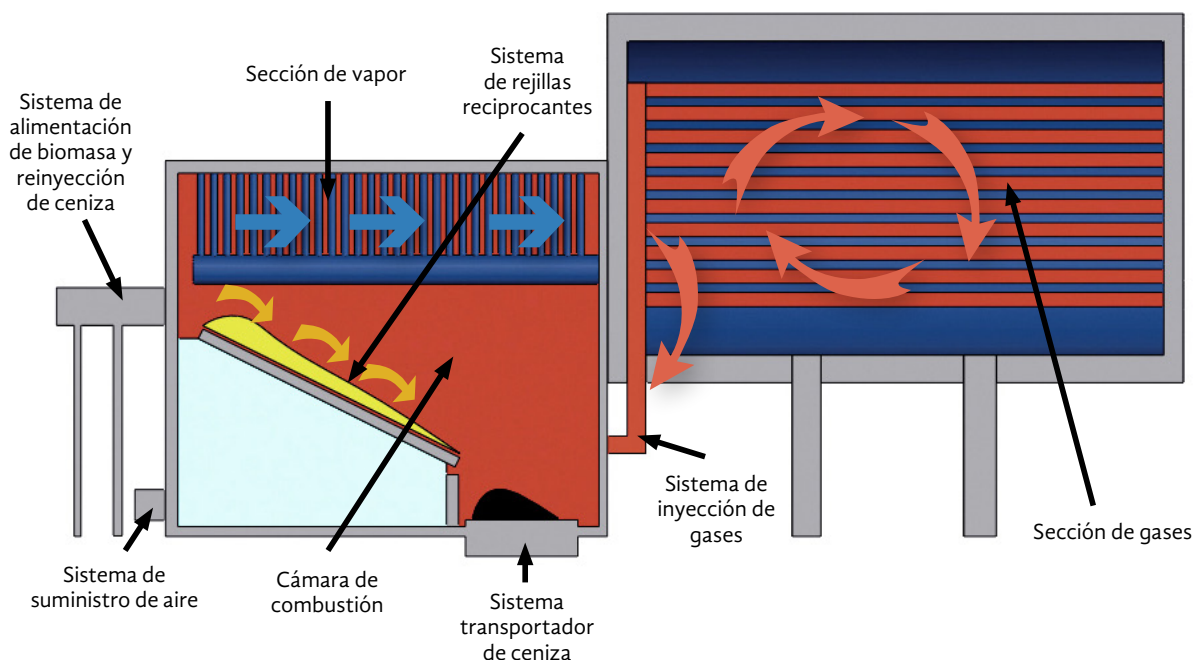
Este artículo analiza la factibilidad de diseñar y fabricar una caldera de biomasa que pueda operar aprovechando los raquis de palma de aceite como combustible. Es así como, resulta atractivo mejorar la comprensión de las consecuencias de la combustión del raquis de palma, pues si se gestiona correctamente, su uso energético puede llegar a ser tecnológicamente viable en un futuro cercano. Este estudio analiza sistemática y detalladamente el estado del arte de la combustión del raquis y sus efectos en las calderas. Los análisis abarcan desde su composición química hasta los mecanismos físico-químicos dentro del hogar de combustión causantes de los problemas tecnológicos. Como resultado de este entendimiento, se plantean soluciones para mejorar la eficiencia térmica y evitar posibles fallas estructurales causadas por la corrosión. Específicamente, se proponen diseños novedosos de calderas de biomasa

que permitan quemar los raquis actualmente desaprovechados energéticamente por la agroindustria de la palma de aceite.

Entendimiento de los problemas tecnológicos asociados a la combustión de los raquis de la palma de aceite

Las calderas de biomasa usadas en las plantas de beneficio de aceite de palma están típicamente compuestas por un sistema de alimentación de biomasa, un sistema de suministro de aire, el hogar de combustión, un lecho fijo que soporta el combustible dentro del hogar de combustión, así como distintas secciones de intercambio de calor (sobrecalentadores, evaporadores, economizadores y precalentadores de aire). Un diseño tradicional se presenta en la Figura 1. El objetivo general de una caldera es aprovechar la mayor cantidad de energía térmica generada durante la combustión y transferirla hacia otro fluido de trabajo en el evaporador y sobrecalentador, que usualmente es vapor de agua.

Figura 1. Esquema de una caldera de biomasa



Un componente crucial en la combustión de biomasa es el lecho sobre el cual se distribuye el combustible dentro del hogar, el cual se compone tradicionalmente de una parrilla transportadora. A medida que ocurre la combustión de la biomasa, las cenizas y los residuos son transportados por la parrilla hasta el final de la cámara de combustión, y luego caen en el sinfín de cenizas que son retiradas de la cámara de combustión. El aire de combustión se divide en dos partes: aire primario y secundario.

El aire primario (de combustión) se distribuye por debajo de las rejillas a través de los tubos, cada uno de los cuales desvía el aire hacia una zona particular de la cámara de combustión. Este aire propicia la volatilización de algunos componentes químicos del combustible, así como el secado de la biomasa con altos contenidos de humedad, del mismo modo sirve para refrigerar la parrilla. Los compuestos no volátiles permanecen en el carbón del combustible y pueden derretirse dependiendo de la composición química de los gases, así como de su temperatura. La mayoría de las partículas de ceniza permanecen en la parrilla, solo una fracción menor se arrastra por los gases de la combustión. En cuanto al aire secundario, este se suministra a través de boquillas situadas en la parte superior de la parrilla. Este completa la combustión de los volátiles y adecúa la temperatura de los gases de escape para su flujo a través de los intercambiadores de calor, mitigando humos, hollín y la generación de inquemados como el monóxido de carbono (Miles *et al.*, 1996).

Por falta de información técnica en la agroindustria de palma de aceite, han ocurrido experiencias en las cuales se han adecuado las calderas de fibra y cuesco de palma de aceite para su operación con raquis, lo cual ha producido fallas catastróficas en las calderas, especialmente la destrucción prematura de los sobrecalentadores, incluso cuando mezclaban solo un 20-30 % en peso de raquis de palma con la mezcla de combustible de fibra de palma y cáscara de palma (Madhiyanon *et al.*, 2012). Esto se explica por combustiones que no tienen en cuenta las características químicas del combustible en el diseño de los componentes de las calderas. Comúnmente, se han presentado los siguientes inconvenientes a nivel operacional cuando se ha quemado el raquis de palma en calderas de biomasa:

1. Un primer problema está relacionado con el manejo y transporte del raquis hacia la caldera. Esto es relevante por su forma característica, pues el

racimo direccionado se engancha fácilmente entre sí, obstruyendo su tránsito hacia la caldera; además, esta misma forma propicia una combustión parcial de la biomasa. Operaciones adicionales de transporte, acondicionamiento y homogenización de los raquis son necesarias para alimentar el hogar de combustión con esta biomasa. Del mismo modo, el uso de parrillas reciprocanes escalonadas ha sido una solución efectiva para reducir estos problemas (Lakshmanan, 2021).

2. Un segundo problema tiene que ver con los altos contenidos de humedad de los raquis de palma (mayores a 50 %). Parte de la energía liberada en la combustión se debe destinar a la evaporación de esta humedad inicial (mucho más alta que en la fibra y cuesco) y no al calentamiento del fluido de trabajo en los intercambiadores de calor. Además, se generan humos en la combustión que se mitigan con un exceso de aire muy alto para los actuales estándares de eficiencia.
3. Un tercer problema es el empobrecimiento de la combustión debido a la aglomeración de la ceniza sobre el combustible en las parrillas. Las capas apelmazadas de ceniza impiden los procesos de volatilización y combustión al aislar los hidrocarburos del aire de combustión. Las malas características de la combustión conducen a un rendimiento desigual y a paradas no programadas de la caldera en caso de no contar con limpieza automática del hogar (Srasri *et al.*, 2022). Otro efecto nocivo de esta problemática es la inestabilidad de la llama de combustión. Esto afecta la distribución de los gases y la integridad de la parrilla al generar depósitos de escoria únicamente en los lugares de alta temperatura.
4. Un cuarto problema se relaciona con el arrastre de ceniza por los gases de combustión. Esta, tiene bajos puntos de fusión, lo cual permite su arrastre inicial en forma de aerosoles, pero también su solidificación y depósito en lugares apartados del hogar. Esta deposición es más probable en lugares donde las partículas flotantes impactan una superficie de baja temperatura, como en los intercambiadores de calor o sus placas piro-tubulares, primero erosionando mediante un proceso abrasivo y posteriormente adhiriéndose a ellas. La formación de capas de ceniza en las paredes de intercambio de calor aumenta la temperatura de los gases circundantes, reduciendo la eficiencia del

proceso de transferencia energética y propiciando temas corrosivos de altas temperaturas.

- El quinto y más importante problema es el de la corrosión acelerada de las superficies metálicas en contacto con los depósitos de ceniza arrastrada en forma de aerosol. Estos lugares son usualmente placas pirotubulares y uniones entre los tubos de los intercambiadores de calor donde la temperatura es elevada al no transferirse el calor hacia el exterior o hacia otro fluido. Esta corrosión depende fundamentalmente de la composición química de los raquis, los cuales causan depósitos de ceniza fundida con altos contenidos de metales alcalinos y alcalinotérreos. También depende del tipo de material usado en la construcción de los componentes de la caldera, típicamente aceros aleados.
- Un sexto problema es el desprendimiento de los depósitos de ceniza en las superficies, las cuales pueden inestabilizar la operación de la caldera. Las paredes del hogar son especialmente propensas a acumular depósitos de ceniza inmanejables que se desprenden y caen, acumulándose sobre el suelo en lugares inapropiados para su remoción.

Finalmente, la ceniza recolectada dentro de la cámara de combustión o en las trampas de ceniza debe disponerse apropiadamente para su posterior ciclo mineral en el ambiente, reponiendo el potasio y fósforo usados por las palmas en las plantaciones. Esto, aunque no es un problema tecnológico en sí mismo,

si debe planificarse de modo técnico y ambientalmente seguro.

Caracterización termoquímica del raquis de palma

El raquis es el residuo más problemático en las plantas de beneficio debido, entre otros, a su geometría y propiedades químicas distintas a las de la fibra y los cuescos, por eso, su caracterización es esencial para el entendimiento profundo de los fenómenos de combustión y corrosión descritos anteriormente. Algunos referentes internacionales y nacionales han publicado la composición química de los raquis de palma dada su aplicabilidad como biomasa para diferentes usos (como suplemento edáfico en la fertilización o biomasa de combustión para procesos de poscosecha y procesamiento). En las Tablas 2a, 2b, 2c y 3 se presentan distintos resultados del análisis de su composición química, incluyendo los estudios originales del presente trabajo, elaborados a partir de raquis de palmas extraídos de plantaciones de la altillanura colombiana.

En los resultados presentados en la Tabla 2c, se observa que los raquis de la palma de aceite contienen 47,7 % de celulosa, 10,8 % de lignina, 21,1 % de hemicelulosas, y 20,4 % de otros componentes solubles. Tienen un gran contenido de humedad, que en algunos casos llega hasta 55 %, así como de metales alcalinos como el potasio (K) y el fósforo (P) que for-

Tabla 2a. Análisis último.

Elementos	(Olisa y Kotingo, 2014)	(García-Núñez et al., 2006)	(Ninduangdee et al., 2015)	(Madhiyanon et al., 2012)	(Ramírez et al., 2011)	(Kaniapan et al., 2021)	Propios
C	43,8	40,88 ± 2,47	48,2	40,7	42,8	42,8	48,03
H	6,2	-	6,49	5,4	6,4	6,2	6,47
O	42,65	-	31,74	47,0	35,8	50,44	39,65
N	0,44	0,87 ± 0,09	0,47	0,3	0,8	0,47	0,77
S	0,09	0,09 ± 0,01	0,1	1,1	0,1	0,09	0,084
K	-	2,23 ± 0,20	-	-	-	-	-
P	-	0,057 ± 0,023	-	-	-	-	-
Na	-	0,010 ± 0,02	-	-	-	-	-

Todas las magnitudes están en % de masa en base seca.

Tabla 2b. Análisis próximo.

Componentes	(Olisa y Kotingo, 2014)	(García-Núñez <i>et al.</i> , 2006)	(Ninduangdee <i>et al.</i> , 2015)	(Madhiyanon <i>et al.</i> , 2012)	(Rosli <i>et al.</i> , 2017)	(Ramírez <i>et al.</i> , 2011)	(Kaniapan <i>et al.</i> , 2021)	Propios
Humedad	8,34	12,3	8,2	38,4	9,51 ± 1,46	6,1	7,3	48,49
Volátiles	79,82	-	74,2	66,1	-	69,5	82,4	77,4
Carbón fijo	13,31	-	12,8	28,4	-	17,9	7,51	17,61
Ceniza	6,87	7,87	4,8	5,5	0,10 ± 0,01	6,5	4,9	4,99

Todas las magnitudes están en % de masa en base seca.

Tabla 2c. Compuestos orgánicos y propiedades energéticas.

Componentes	(Olisa y Kotingo, 2014)	(García-Núñez <i>et al.</i> , 2006)	(Ninduangdee <i>et al.</i> , 2015)	(Rosli <i>et al.</i> , 2017)	(Ramírez <i>et al.</i> , 2011)	(Kaniapan <i>et al.</i> , 2021)	Propios
Lignina*	-	10,8	-	27,7 ± 0,68	12,0	12,5	-
Celulosa*	-	47,7	-	-	66,0	34,4	-
Extractos*	-	20,4	-	12,9 ± 2,25	-	-	-
Hemicelulosa*	-	21,1	-	-	-	26,7	-
Poder calorífico inferior (MJ/kg)	19,25	-	18,4	-	-	-	16,27
Poder calorífico superior (MJ/kg)	-	-	-	-	17,9	16,9	17,66

*Las magnitudes están en % de masa en base seca.

man compuestos con bajas temperaturas de fusión y pueden condensarse como cloruros. El metal alcalino que más preocupa es el potasio, pues la mayor parte de este se libera en la fase gaseosa durante la combustión y está presente principalmente como cloruro de potasio (KCl) e hidróxido de potasio (KOH) (Ngamsidhiphongs *et al.*, 2021). También se observa el alto poder calorífico de los raquis de palma, con un valor promedio de 18 MJ/kg, actualmente desaprovechado para la generación de vapor en las calderas.

Un indicador muy importante para dimensionar la capacidad corrosiva de los gases de la combustión del raquis es su relación molar entre cloro (Cl) y azufre (S). Debido a que son compuestos básicos y ácidos respectivamente, estos se neutralizan entre sí. Una proporción mayor de cloro que de azufre activa procesos corrosivos debido a la ausencia de sulfuros.

La Tabla 3 muestra los componentes de la ceniza del raquis. Se observa el predominio del superóxido de potasio (K_2O), así como de cloro (Cl). En menor proporción la ceniza se compone de óxidos de calcio (CaO), silicio (SiO_2) y fósforo (P_2O_5). Esto se explica por los ciclos de los minerales y sus correspondientes flujos entre el sustrato y las plantas. Los metales pesados se acumulan en el raquis, siendo un tejido más cercano al tronco de la palma que a su fruto. El contenido de cloro (Cl) es mayor a 2 % y tiene una importancia crucial en la disminución de la temperatura de fusión de la ceniza. Este, está relacionado en forma inversamente proporcional a la temperatura de fusión de la ceniza, por lo tanto, un alto contenido de cloro afectará inmediatamente la adhesión de la ceniza, focalizando su actividad química. Además, es un elemento catalizador que disocia los componen-

tes químicos del acero de aleación, inclusive a bajas temperaturas, liberando el hierro (Fe) para la formación de óxidos.

Tabla 3. Caracterización de las cenizas del raquis.

Componentes	(Madhiyanon <i>et al.</i> , 2012)	Propios
SiO ₂	12,12	40,87
Al ₂ O ₃	0,26	4,77
TiO ₂	-	0,21
Fe ₂ O ₃	-	2,84
CaO	9,65	8,02
MgO	1,90	3,92
Na ₂ O	0,09	1,09
K ₂ O	55,48	38,00
P ₂ O ₅	3,58	3,44
SO ₃	1,66	1,96
Cl	6,84	2,86
CO ₂	-	1,42

Todas las magnitudes están en % de masa en base seca.

En la práctica, la temperatura de fusión de las cenizas determina cuán alta puede ser la temperatura de la combustión. En el estudio llevado a cabo por (Horák *et al.*, 2019), se seleccionaron distintas biomásas y se determinó la influencia de la composición de las cenizas en su actividad corrosiva debida a su fluencia en forma de aerosoles. Los resultados indican que las temperaturas de fusión son más bajas para el raquis de palma que para otras biomásas debido a su baja concentración de silicio o calcio, pero especialmente a su alta concentración de metales alcalinos.

La Tabla 4 presenta los resultados del análisis último de la fibra de palma de aceite. Se aprecia aquí la marcada diferencia de concentración de metales alcalinos como el potasio en los raquis en comparación con la fibra. Esto evidencia la fenomenología particular de la combustión del raquis respecto de otras biomásas extraídas de la palma de aceite. Explica también los problemas típicos de operación de las calderas de biomasa cuando se sustituye parcialmente la fibra de palma con raquis como combustible.

Tabla 4. Análisis último de la fibra de palma de aceite.

Elementos	(García-Núñez <i>et al.</i> , 2006)	(Kaniapan <i>et al.</i> , 2021)
C	43,4 ± 2,3	43,17
H	-	06,09
O	-	49,75
N	1,21 ± 0,08	0,9
S	0,18 ± 0,02	0,09
K	0,52 ± 0,04	-
P	0,059 ± 0,007	-
Na	0,0033 ± 0,002	-

Todas las magnitudes están en % de masa en base seca.

Entendimiento de los fenómenos nocivos al interior de las calderas asociados a la combustión del raquis de palma

El fenómeno de corrosión dentro de las calderas operando con raquis de palma puede ocurrir en las distintas etapas de la misma, ya sea en los elementos de la cámara de combustión como las parrillas, las zonas de flujo de los gases de combustión como intercambiadores o en los elementos estructurales de la caldera. En cada una de ellas puede ocurrir un proceso de corrosión distinto.

Un común activador de la corrosión asociada con los raquis son las intensas transformaciones químicas de la ceniza que ocurren a altas temperaturas. En especial la vaporización del sodio, azufre y cloro durante la combustión, los cuales surten reacciones químicas cuando se encuentran en fase gaseosa y producen cloruros o sulfatos. Estos productos se condensan a bajas temperaturas de los gases de escape, generando nucleación y precipitación sobre las superficies de la caldera, especialmente sobre las que se encuentran aguas abajo y son responsables del aprovechamiento y transferencia energética. Por ejemplo, cuando los gases de escape entran en contacto con superficies a temperaturas menores a 105 °C se condensan tanto los productos de la reacción como el agua del vapor producido en la combustión (también evaporada de la alta humedad inicial de la biomasa).

1. El vapor de agua condensado proveniente de los gases reacciona con el azufre presente en los gases de la combustión. Dicha reacción produce, entre otros compuestos químicos, ácido sulfúrico (H_2SO_4), enérgico agente corrosivo por su carácter ácido. La deposición de ácido sulfúrico genera una alta corrosión y adelgazamiento del material en uniones soldadas en aceros de baja aleación empleados en tuberías de conducción de vapor.
2. El cloro condensado proveniente de los gases es otro elemento químico del raquis que provoca un aumento de la sulfuración en contacto con productos condensados. El HCl gaseoso corroe también las superficies al formar cloruros y producir oxidación activa, especialmente en zonas en condiciones reductoras (deficientes en oxígeno) debido a la combustión y al impacto directo de la llama (Nielsen *et al.*, 2000). Por lo mismo, este tipo de corrosión se presenta más frecuentemente en los elementos estructurales dentro de la cámara de combustión.

Una segunda situación es la corrosión alcalina debida a la presencia del fósforo y el potasio. Estos metales reaccionan fácilmente a temperaturas altas formando sales inorgánicas tales como cloruros, óxidos y sulfatos (Horák *et al.*, 2019). Bajas temperaturas de fusión por la presencia de estas sales significan un mayor arrastre por los gases en forma de aerosoles y su consecuente depósito en superficies metálicas de bajas temperaturas. Los problemas de corrosión más graves en los sistemas de combustión de biomasa ocurren gracias a la formación de dichos depósitos que ocurre comúnmente en los tubos del sobrecalentador. También debido a la ocurrencia de reacciones químicas secundarias durante su arrastre por los gases de la combustión.

3. El rápido crecimiento de los depósitos finales de cenizas en los componentes de intercambio de calor retrasa significativamente la transferencia de calor: aumenta las temperaturas en el lado de los gases y disminuye las temperaturas del fluido de trabajo. Esto repercute negativamente en la activación de reacciones químicas en los gases de combustión, como los descritos anteriormente.
4. Temperaturas de metales que exceden los 500 °C activan procesos oxidante-reductores (redox, en los cuales hay transferencia de electrones) que se dan entre el metal y los óxidos/sales (cloruros) de metales alcalinos, particularmente, debido a las

altas concentraciones de K_2O y KCl en los depósitos de ceniza del raquis. Estos procesos altamente corrosivos ocurren a temperaturas bajo el punto de fusión del KCl , focalizándose especialmente en las superficies de los sobrecalentadores.

5. La corrosión puede verse reforzada por el SO_2 , que puede provocar la sulfatación de los cloruros alcalinos dentro del depósito, liberando HCl o Cl_2 cerca de la superficie del metal (Horák *et al.*, 2019). En caso de que la temperatura de la superficie del metal sea lo suficientemente alta como para que se formen fases fundidas en el depósito (de los compuestos químicos que componen los gases de combustión), la corrosión puede aumentar aún más (Horák *et al.*, 2019).
6. Las partículas de cenizas volantes transportadas a alta velocidad en forma de aerosoles impactan contra las paredes del hogar de combustión generando la abrasión directa de las superficies. Este fenómeno se le denomina erosión y es semejante a la corrosión química descrita anteriormente.

Se llega a la conclusión de que la combustión de raquis de palma iniciará inevitablemente la fusión de las cenizas, su arrastre en forma de aerosoles, la posterior acumulación de los depósitos solidificados y la consiguiente activación de la corrosión en superficies que excedan los 500 °C. Además, se presentarán también procesos erosivos en los elementos que enfrentan los gases de combustión cargados con las cenizas.

Propuestas tecnológicas para el diseño de calderas de biomasa que usen raquis de palma como combustible

Por las razones anteriormente expuestas, si se desea aprovechar los raquis de palma como combustible dentro de las calderas de biomasa es necesario, en parte, contar con el control detallado de las temperaturas y velocidades al interior de la caldera, así como de la distribución del raquis sobre la parrilla.

Dentro del hogar de combustión es muy importante tener en cuenta:

- Controlar la distribución y composición de los raquis de palma sobre las parrillas en la cámara de combustión, permitiendo así combustiones más homogéneas, la remoción de cenizas, la limitación de la fundición de las cenizas y el control

de la composición de los gases de la combustión. Una propuesta es la optimización del sistema de combustión mediante parrillas escalonadas y reciprocantes. Esto puede mejorar la eficiencia de la combustión de la biomasa y reducir las emisiones de contaminantes atmosféricos. La parrilla escalonada está diseñada para transportar los raquis desde el punto de alimentación hasta el punto de descarga de cenizas mediante movimientos reciprocantes de las barras, que están dispuestas en filas intercaladas fijas y móviles. Se debe intentar que la alimentación distribuya el combustible fresco de manera uniforme y a un ritmo constante sobre la totalidad de las barras de la parrilla. No se deben adoptar métodos de limpieza (manual o automáticos) de ceniza sobre la parrilla: un diseño óptimo debe mantener bajo el nivel de deposición de las cenizas en lugares distintos a los depósitos de ceniza.

- Precalentar el aire primario para disminuir el contenido de humedad de los raquis a valores menores a 40 %. Esto es necesario para evitar problemas en la combustión y permitir la aplicación del control automatizado de la combustión actualmente en funcionamiento en calderas de biomasa, especialmente en las instaladas en plantas de beneficio de aceite de palma. Sin embargo, precalentar el aire también puede producir un efecto indeseado sobre los gases de la combustión: su aumento de temperatura sobre la parrilla, una mayor flotabilidad de los gases, la generación de turbulencia y el aumento de la transferencia de calor hacia las paredes del hogar. Una propuesta es la de propiciar cuatro zonas de diferentes procesos dentro de la cámara de combustión. Una primera zona de secado con aire precalentado únicamente inyectado en esta primera franja, y una segunda franja que incluya la zona de desvolatilización, la zona de combustión y la zona de quema de carbón fijo. El aire se inyecta a temperatura ambiente en esta segunda franja para evitar las altas temperaturas y propiciar gradientes térmicos que influyan en la flotabilidad y turbulencia de los gases.
- Disminuir el exceso de aire en la combustión a valores en el rango de 25 % a 40 %, lo que permite el diseño de equipos más eficientes y similares a los actualmente instalados en las plantas de beneficio de palma. Para esto se debe suministrar el aire primario a las cuatro zonas de combustión desde debajo de la parrilla para el acondiciona-

miento de los raquis en el lecho del combustible, mientras que el aire secundario se debe suministrar a una altura suficiente sobre la parrilla que propicie la combustión de los volátiles y la separación de las zonas de combustión. Este diseño es clave para mejorar la eficiencia en la transferencia de calor por convección hacia las paredes del hogar. Fenómeno que resulta irrevocablemente en el control de la temperatura de los gases.

- En cuanto al diseño de la caldera, el volumen de la cámara de combustión, los sistemas de combustión y los ductos de escape deben estar diseñados para permitir la correcta evacuación de cenizas, así como limitar a 900 °C la temperatura de los gases de combustión a la salida de la caldera. Una opción para lograr este propósito es tener un gran volumen del hogar aumentando su altura. Esto propicia un área mayor de intercambio de calor de los gases de la combustión, que disminuye su temperatura.

En los intercambiadores de calor es indispensable:

- Controlar las temperaturas tanto del lado de los gases como del lado del vapor para evitar las corrosiones ácidas y alcalinas. Esta última debe controlarse para disminuir el ritmo de corrosión por los depósitos de ceniza. Es importante saber que el rango de 500 °C a 550 °C en el vapor es especialmente susceptible a corrosión.
- Controlar las velocidades de los gases de combustión para evitar la corrosión/erosión debido al flujo de cenizas alcalinas y su impacto en las paredes de la caldera. La geometría de los ductos por donde fluyen los gases debe tener en cuenta los puntos donde la ceniza tenderá a impactar y posteriormente depositarse. Por ejemplo, esto se presenta generalmente en las placas pirotubulares de los intercambiadores de calor. Para ello, una herramienta científica y tecnológica fundamental en el diseño de estas geometrías es la dinámica de fluidos computacional. Dicha herramienta logra el entendimiento completo de los campos de flujo de los gases, lo que optimiza el flujo que impacta sobre las superficies, elimina vórtices locales en el campo de flujo y evita puntos de acumulación.
- Usar materiales aleados que soporten la corrosión activa del cloro, por ejemplo, aleaciones de acero con altos porcentajes de cromo o níquel, como lo recomienda la norma ASME dedicada a calderas y recipientes de presión, sección I (ASME, 2002).

Otra opción es recubrir la superficie de dichos elementos con níquel, cobalto o cromo. Este último tipo de recubrimiento permite obtener una protección adicional cuando el oxígeno actúa sobre el cromo en el proceso de combustión, lo que genera una película de óxido de cromo que protege la integridad estructural ante sustancias alcalinas.

Otras estrategias pueden ser:

- La inclusión de aditivos que modifiquen la química de las cenizas y los gases de combustión, especialmente de aquellos que controlen la fusión de las cenizas en el hogar, reduciendo la proporción de partículas o aerosoles de cenizas en el flujo de gases de combustión. Un aditivo puede ser el azufre, debido a que en proporciones molares con el cloro menores a dos tiene un efecto neutralizador que aumenta la temperatura de fusión de la ceniza. Además, con la adición de sulfatos se forman sulfuros de hierro dentro del óxido de los elementos metálicos, lo que reduce la activación del proceso de corrosión por la casi ausencia de cloruros de hierro. También se puede adicionar caolín o sulfato de amonio para cambiar las propiedades de las cenizas y, eventualmente, los mecanismos de formación de las mismas (Madhiyanon *et al.*, 2012).
- La inclusión de elementos fusibles expuestos a los gases de la combustión de la biomasa para focalizar en estos el crecimiento de los depósitos de ceniza. Estos elementos sufrirían una corrosión acelerada *in situ*, midiendo los resultados de adelgazamiento del material y reemplazándolos preventivamente.
- Incluir películas fluidas sobre los tubos de intercambio de calor. Esto puede favorecer la transferencia de calor, así como controlar la fuerza de corte de las partículas sobre las paredes y su adherencia a las mismas. Los recubrimientos de alambre o polvo muestran buenas propiedades para proteger los tubos de acero de los intercambiadores, contra la erosión producida por el impacto de las cenizas en los gases de combustión.

A partir de las estrategias anteriormente descritas, se propone un diseño de caldera que implemente las recomendaciones enunciadas. Dicho diseño considera un adecuado volumen del hogar de combustión, su división en distintas zonas de adecuación del raquis sobre parrillas escalonadas y reciprocantes, cuya temperatura media estimada sobre el lecho de

combustible sea menor a 770 °C, así como la correcta distribución del aire de combustión primario precalentado y secundario a temperatura ambiente.

Se propone con este diseño que las temperaturas medias durante el secado, la desvolatilización y la combustión, y las zonas de combustión del carbón, sean menores a 400 °C, 500 °C, 700 °C y 1.000 °C, respectivamente. Con una inyección de aire secundario a una altura suficiente sobre la parrilla, se entiende que los gases se queman completamente y se generan efectos turbulentos sobre los mismos. Aguas abajo del punto de inyección secundario se presentan temperaturas que disminuyen considerablemente antes de su evacuación debido a la altura del hogar y al mayor intercambio de calor convectivo con las paredes del mismo. El diseño también considera una planeación de ductos que limite las recirculaciones del gas, mejore su flujo a través de los intercambiadores de calor, y que además incluya en la configuración de los sobrecalentadores algunas de las estrategias descritas anteriormente en este apartado.

Conclusiones

Uno de los obstáculos más importantes para el uso energético del raquis de palma es la inadecuada configuración de las tecnologías empleadas para el aprovechamiento de su combustión. Los componentes más abundantes en la biomasa de raquis de palma son potasio y fósforo, pero también cuenta con altas concentraciones de cloro, silicio y calcio. Estos forman cenizas con bajos puntos de fusión, que son arrastradas por los gases de la combustión causando graves incrustaciones, escoriación, abrasión y corrosión. El objetivo de este trabajo ha sido el de propiciar el estudio y, consecuentemente, el control de las problemáticas asociadas con su combustión en calderas de biomasa.

La eficiencia e integridad de la caldera dependerá completamente del diseño particular en función de las características del raquis. Esto es, el diseño en función de la naturaleza del raquis de palma como combustible y sus impactos en los componentes de la caldera. Algunas consideraciones prácticas sobre el diseño de los componentes de dicha caldera tienen que ver con:

- El correcto diseño del sistema de alimentación del combustible, la parrilla soporte del combustible, el volumen del hogar de combustión.

- El manejo y control de los gases de la combustión en su paso por los intercambiadores de calor.
- Otras estrategias exploratorias de control químico o mecánico del combustible o de los gases de combustión se plantean como posibilidades complementarias.

Este artículo sugiere la necesidad de hacer trabajos conjuntos industria-academia, así como generar capacidades permanentes de investigación, desarrollo e innovación. Relación que inequívocamente resulta en la elaboración de productos industriales novedosos basados en investigación aplicada. Por ejemplo, se demuestra aquí el proceso de estudio técnico que resulta en nuevos prototipos y secretos industriales del diseño y la fabricación de calderas. Aspectos claves de las calderas que han sido gestados a partir del proyecto conjunto de investigación de VR Ingeniería y el Centro de Ingeniería Avanzada, Investigación y Desarrollo. Toda génesis de nuevas líneas de aprovechamiento energético, disminución de costos y generación de retorno tienen como base el entendimiento a profundidad del conocimiento técnico-científico involucrado en ellas.

Como fase subsiguiente del presente artículo es importante:

- Realizar un análisis de viabilidad técnico-financiera de las propuestas tecnológicas descritas en el presente artículo.
- Especialmente mediante el contraste con la utilización del raquis en la industria como complemento edáfico para la fertilización de la palma de aceite, como se hace con alguna frecuencia hoy en día.

De esos análisis se derivaría un mayor entendimiento del sentido técnico/económico, el alcance de la inversión y en dado caso, el desarrollo/prueba del prototipo de la caldera aquí enunciada.

Agradecimientos

Camilo Bayona-Roa y Juan Guillermo García-Navarro agradecen el apoyo técnico científico brindado por el Centro de Ingeniería Avanzada, Investigación y Desarrollo (CIAID). Especialmente a Diego Castellanos y Sebastián Gómez por el apoyo prestado en la ilustración y documentación para la redacción de este artículo.

Bibliografía

- Albarracín Becerra, F. H. & Méndez Rangel, J. P. (2019). *Diseño y evaluación de un sistema co-firing biomasa—Biogás en una planta extractora de aceite de palma*. Universidad Autónoma de Bucaramanga.
- ASME. (2002). *ASME Boiler and Pressure Vessel Code: An International Code*. American Society of Mechanical Engineers New York.
- Bayona Roa, C. A. (2011). *Modelamiento matemático de un secador solar de plantas aromáticas*. Universidad Nacional de Colombia.
- Betancourt Prisco, J. C. & Ospina Berrío, J. E. (2010). *Diseño y construcción de un prototipo de caldera que usa como combustible cáscara de *Jatropha Curca**. Universidad EAFIT.
- Carvajal Díaz, P. D. (2018). *Estudio de desempeño de un sistema de co-combustión biomasa—biogás en una caldera de parrilla utilizando la herramienta Thermoflex*. Universidad Autónoma de Bucaramanga.

- Chiew, Y. L. & Shimada, S. (2013). Current State and Environmental Impact Assessment for Utilizing Oil Palm Empty Fruit Bunches for Fuel, Fiber and Fertilizer—A Case Study of Malaysia. *Biomass and bioenergy*, 51, 109-124.
- Fedepalma. (2022). *Informe de Gestión Fedepalma 2021* (p. 108). Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite, Fedepalma.
- Galindo-García, I. F., Vázquez-Barragán, A. K. & Rossano-Román, M. (2012). *CFD Simulations as a Tool for Flow and Thermal Analysis in Boilers of Power Plants*. 6.
- García-Núñez, J. A., García-Pérez, M. & Das, K. C. (2006). Determination of Kinetic Parameters of Thermal Degradation of Palm Oil Mill by Products Using Thermogravimetric Analysis and Differential Scanning Calorimetry. *2006 Portland, Oregon, July 9-12, 2006*. doi: <https://doi.org/10.13031/2013.21519>
- Hernández, J. C. B., Contreras, N. E. R. & Núñez, J. A. G. (2018). Combustión de biomasa: conceptos, tecnologías y aplicaciones en la agroindustria de la palma de aceite. *Revista Palmas*, 39(4), 24-44.
- Horák, J., Kuboňová, L., Dej, M., Laciok, V., Tomšejová, Š., Hopan, F., Krpec, K. & Koloničný, J. (2019). Effects of the type of Biomass and Ashing Temperature on the Properties of Solid Fuel Ashes. *Polish Journal of Chemical Technology*, 21(2).
- Kaniapan, S., Hassan, S., Ya, H., Patma Nesan, K. & Azeem, M. (2021). The Utilization of Palm Oil and Oil Palm Residues and the Related Challenges as a Sustainable Alternative in Biofuel, Bioenergy, and Transportation Sector: A Review. *Sustainability*, 13(6), 3110.
- Lakshmanan, S. (2021). Lessons Learnt from Biomass-fueled Power Plant. *Journal of Oil Palm, Environment and Health (JOPEH)*, 12.
- Loh, S. (2017). The Potential of the Malaysian Oil Palm Biomass as a Renewable Energy Source. *Energy Conversion and Management*, 141, 285-298.
- Madhiyanon, T., Sathitruangsak, P., Sungworagarn, S., Pipatmanomai, S. & Tia, S. (2012). A Pilot-scale Investigation of Ash and Deposition Formation During Oil-Palm Empty-Fruit-Bunch (EFB) Combustion. *Fuel processing technology*, 96, 250-264.
- Miles, T. R., Miles Jr., T. R., Baxter, L. L., Bryers, R. W., Jenkins, B. M. & Oden, L. L. (1996). Boiler Deposits from Firing Biomass Fuels. *Biomass and Bioenergy*, 10(2-3), 125-138.
- Ngamsidhiphongs, N., Ghoniem, A. F. & Arpornwichanop, A. (2021). Detailed Kinetic Mechanism of Devolatilization Stage and CFD Modeling of Downdraft Gasifiers Using Pelletized Palm Oil Empty Fruit Bunches. *Renewable Energy*, 179, 2267-2276.
- Nielsen, H. P., Frandsen, F. J., Dam-Johansen, K. & Baxter, L. L. (2000). The Implications of Chlorine-associated Corrosion on the Operation of Biomass-fired Boilers. *Progress in Energy and Combustion Science*, 26(3), 283-298.
- Ninduangdee, P., Kuprianov, V. I., Cha, E. Y., Kaewrath, R., Youngyuen, P. & Atthawethworawuth, W. (2015). Thermogravimetric Studies of Oil Palm Empty Fruit Bunch and Palm Kernel Shell: TG/DTG Analysis and Modeling. *Energy Procedia*, 79, 453-458.

- Olisa, Y. P. & Kotingo, K. W. (2014). Utilization of Palm Empty Fruit Bunch (PEFB) as Solid Fuel for Steam Boiler. *European Journal of Engineering and Technology*, 2(2).
- Pérez, C. I. T. & López, L. A. Q. (2019). Análisis de residuos sólidos de palma africana, como alternativa de aprovechamiento de energías renovables en el departamento del Cesar. *Ingenierías USBMed*, 10(1), 8-18.
- Ramírez, C., Nidia, E., Garzón, E. M., Silva, R., Ángela, S., Yáñez, A. & Edgar, E. (2011). *Caracterización y manejo de subproductos del beneficio del fruto de palma de aceite*.
- Rosli, N. S., Harun, S., Jahim, J. M. & Othaman, R. (2017). Chemical and Physical Characterization of Oil Palm Empty Fruit Bunch. *Malaysian Journal of Analytical Sciences*, 21(1), 188-196.
- Serrano, M. (1995). Utilización de los racimos vacíos de la palma de aceite. *Revista Palmas*, 16(especial), 114-120.
- Srasri, S., Bhudsarakam, N., Limsutthiphong, P., Ratanapitag, T. & Julsereewong, A. (2022). Design of Step Grate Firing by Utilizing Palm Empty-Fruit-Bunch Fuel for Industrial Steam Boiler Construction. *Energy Reports*, 8, 275-282.
- Taishan Group (2017). Empty Fruit Bunch Boiler. Recuperado de <http://www.coalbiomassboiler.com/empty-fruit-bunch-boiler/>
- Van Dam, J. (2016). Subproductos de la palma de aceite como materias primas de biomasa. *Revista Palmas*, 37, 149-156.
- Villamil Franco, L. & Cuartas Ramos, I. (2017). *Diseño del sistema de distribución de aire para la combustión de bagazo de caña de azúcar en una caldera acuotubular mediante simulación CFD*. Universidad del Valle.



Los recursos del Fondo de Fomento Palmero

tienen como propósito proveer bienes públicos de interés sectorial que contribuyen a aumentar la productividad, rentabilidad y sostenibilidad de la agroindustria de la palma de aceite.

Aprovechamiento de la biomasa residual como fuente de energía renovable en Colombia: escenario de gasificación potencial

Harnessing Residual Biomass as a Renewable Energy Source in Colombia: A Potential Gasification Scenario

CITACIÓN: Pérez-Rodríguez, C. P., Ríos, L. A., Duarte-González, C. S., Montaña, A. & Marcía-Marroquín, C. (2023). Aprovechamiento de la biomasa residual como fuente de energía renovable en Colombia: escenario de gasificación potencial. *Palmas*, 44(1), 65-82.

Editores Académicos: Erol Kurt y José Manuel López-Guede.

Nota del editor: MDPI se mantiene neutral con respecto a las reclamaciones jurisdiccionales en los mapas publicados y las afiliaciones institucionales.

PALABRAS CLAVE: Biomasa, Potencial, Energía renovable, Gasificación.

KEYWORDS: Biomass, Potential, Renewable energy, Gasification.

* Traducido del original Harnessing Residual Biomass as a Renewable Energy Source in Colombia: A Potential Gasification Scenario. Recuperado de <https://doi.org/10.3390/su141912537>

Derechos de autor: © 2022 de los autores. Licenciado MDPI, Basilea, Suiza. Este documento es un artículo de acceso abierto bajo los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Attribution (CC BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

PÉREZ RODRÍGUEZ, CLAUDIA PATRICIA
Grupo Poscosecha de Productos
Agrícolas, departamento de
Ingeniería Civil y Agrícola,
Universidad Nacional de Colombia.
Autor para correspondencia
cpperezr@unal.edu.co

RÍOS, LUIS ALBERTO
Grupo Procesos Químicos
Industriales, departamento de
Ingeniería Química, Universidad
de Antioquia, Calle 70 No. 52-21,
Medellín 050010, Colombia

DUARTE GONZÁLEZ, CARMEN SOFÍA
Grupo Poscosecha de Productos
Agrícolas, departamento de
Ingeniería Civil y Agrícola,
Universidad Nacional de Colombia

MONTAÑA, ANDRÉS
Grupo Poscosecha de Productos
Agrícolas, departamento de
Ingeniería Civil y Agrícola,
Universidad Nacional de Colombia

GARCÍA MARROQUÍN, CATALINA
Grupo Poscosecha de Productos
Agrícolas, Departamento de
Ingeniería Civil y Agrícola,
Universidad Nacional de Colombia

Resumen

Actualmente, el desarrollo de formas nuevas o más eficientes de producir bioenergía ha hecho que los gobiernos de todo el mundo asuman compromisos. Estos compromisos se convierten, a escala nacional, en políticas y estrategias gubernamentales que pretenden descarbonizar la

matriz energética de cada país. El primer paso para un desarrollo eficiente es la cuantificación y la caracterización del potencial energético de la biomasa disponible. Bajo este marco, este estudio establece el potencial energético de la biomasa residual producida por los procesos agrícolas, agroindustriales y forestales en Colombia, siendo la gasificación la tecnología de transformación seleccionada. Para ello, se analizaron datos de fuentes primarias y secundarias. Posteriormente, se priorizaron algunas biomásas en función de su disponibilidad y propiedades fisicoquímicas. Luego, se estimó el potencial energético teórico de la biomasa total producida en estos sectores productivos, utilizando sus propiedades fisicoquímicas. Se estimó el potencial técnico de bioenergía del país (204,8-235,3 PJ), considerando el nivel actual de biomasa no utilizada y evaluando los requisitos logísticos y de acondicionamiento del proceso de gasificación, teniendo en cuenta los picos y valles de producción en el país. Por lo tanto, si toda la biomasa se procesara en una planta de gasificación (22,2-24,0 % de eficiencia), como se propone en este estudio, entonces la capacidad instalada (si el factor de uso de la planta fuera de 85 %) oscilaría entre 1.696,7-2.111,3 MW. Los resultados de la presente investigación fueron validados por representantes de gremios, empresas y entidades gubernamentales.

Abstract

Currently, developing new or more efficient ways of producing bioenergy has caused governments from around the world to formulate compromises. These compromises translate, on a national scale, into government policies and strategies that aim to decarbonize the energy matrix of each country. The first step for efficient development is the quantification and energy-potential characterization of the available biomass. Using this framework, this study establishes the energy potential of the residual biomass produced by agricultural, agro-industrial, and forestry processes in Colombia, with gasification being the selected transformation technology. For this purpose, data from primary and secondary sources were analyzed. Next, some biomasses were prioritized according to their availability and physicochemical properties. Then, the theoretical energy potential of the total biomass produced in these productive sectors was estimated by using its physicochemical properties. The technical biomass-energy potential of the country (204.8–235.3 PJ) was estimated by considering the current level of unused biomass and evaluating the logistics and conditioning requirements of the gasification process, while accounting for the peaks and off-peaks of production in the country. Thus, if all the biomasses were processed in a gasification plant (22.2–24.0% efficiency), as proposed in this study, then the installed capacity—if the plant-use factor was 85%—would range between 1696.7–2111.3 MW. The results of the present research were validated by representatives of unions, companies, and government entities.

Introducción

Debido a su naturaleza renovable y su potencial como sustituto de los combustibles fósiles, la biomasa ha atraído y sigue atrayendo la atención de investigadores y empresas que buscan fuentes valiosas de energía [1]. Además, estos esfuerzos están alineados con el séptimo Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) propuesto por la ONU: “Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna” [2]. En efecto, el uso de la biomasa como fuente de energía renovable ha reducido las emisiones de CO₂ en la mayoría de los países que la han adoptado [3]. Según los

informes de la Agencia Internacional de la Energía, para 2019, las energías renovables representaban el 23,2 % de la generación eléctrica mundial, mientras que, para la energía generada por carbono, este valor fue del 37,8 %. Por lo tanto, la bioenergía es la cuarta fuente de energía más importante en todo el mundo, después del petróleo, el carbón y el gas natural [4]. En el caso de América Latina, en 2020 se generaron 85.014 GWh de bioenergía, lo que la convierte en la segunda fuente de energía más importante del continente, después del petróleo. Cabe señalar que esta la están utilizando en mayor medida en los países en desarrollo, aunque en la actualidad la mayor parte proceda de países desarrollados [5].

Una de las barreras para adoptar la biomasa como fuente de energía renovable son los costos logísticos asociados con su recolección, almacenamiento y transporte; sin embargo, tecnologías de densificación han sido estudiadas como una solución viable para reducir estos costos [6]. De hecho, el desarrollo de estas tecnologías, junto con las estrategias que actualmente están implementando los gobiernos, como los impuestos y bonos de carbono, están fomentando el uso de la biomasa [7].

Hoy en día, contamos con mucha información sobre el potencial energético de diferentes regiones del mundo. Por ejemplo, un estudio sobre bioenergía en Turquía estima que hay 73 MW potencialmente disponibles de esta fuente en el país. Cabe mencionar que la mayor parte de la biomasa producida en Turquía proviene de residuos forestales y de poda de cultivos, lo que hace que la combustión y la cogeneración sean las tecnologías de transformación más relevantes en ese contexto [8]. Del mismo modo, el potencial energético de la biomasa sólida (residuos agroindustriales y del campo) en Croacia oscila entre 12,18 y 51,14 PJ [9]. Por otro lado, en la región de Sabah en Malasia, el potencial de bioenergía anual de la palma de aceite (y otras fuentes de biomasa menores) fue de 267,18 PJ. Según el autor del estudio, si este potencial energético se convirtiera realmente, con un 25 % de eficiencia sería suficiente para abastecer 3,8 veces las demandas de energía de la región [10]. Finalmente, un estudio realizado en Brasil encontró que podrían producirse 9.947,12 GWh/año a través del biogás en el área de Paraná, donde los subproductos de cultivos como la caña de azúcar, la soya, el maíz y la yuca representan el 79,7 % del potencial energético y la biomasa generada por el ganado representa el 14,8 % de este potencial [11].

En el caso de Colombia, que goza de una geografía y una ubicación privilegiadas, la producción de cultivos a gran escala como la caña de azúcar y la palma de aceite, así como las múltiples temporadas de cosecha de diferentes cultivos a lo largo del año, generan un flujo constante de biomasa que podría aprovecharse para la producción de energía. Por ejemplo, en 2019, la producción agrícola total del país fue de 63,2 millones de toneladas, que se dividió así: caña de azúcar, 23 millones de toneladas; caña de panela, 11 millones; racimos de fruta de palma de aceite, 6,6 millones; plátano, 4,1 millones; banano, 2,1 millones; arroz, 1,9 millones; entre otros cultivos que no estuvieron tan ampliamente representados [12]. Además,

cabe señalar que la agricultura a pequeña escala, de granjas de 5 hectáreas o menos, representa el 60 % de la producción total del país [12]. El potencial bioenergético de Colombia, 400-750 PJ por año, se ha calculado utilizando los cultivos más grandes, los desechos animales, los residuos forestales y los residuos urbanos como las principales fuentes de biomasa al considerar la cogeneración y la biodigestión como las tecnologías de transformación [13-16]. Más específicamente, un estudio sobre el potencial de biogás mostró un total de 150,8 PJ de energía disponible en Colombia [17]. El potencial energético de la biomasa agrícola en particular se ha estimado en 331,65 PJ/año [13]. Para poner estos datos en perspectiva, Colombia consume alrededor de 1.336 PJ/año, que se distribuye entre los sectores de transporte (41,2 %), industrial (22,5 %), residencial (19,3 %) y público (17 %) [18]. Su generación de electricidad, que equivale a 16.994 GWh (230,4 PJ), actualmente se suministra principalmente por generación hidráulica (71,9 %) y térmica (26,7 %) [19].

La gasificación, un proceso eficiente de conversión termoquímica utilizado para transformar diferentes materiales en un gas combustible (*syngas*), puede utilizarse para aprovechar el potencial bioenergético antes mencionado y para diversificar las fuentes de energía del país. De hecho, a través de una combinación de procesos superpuestos como la pirólisis, el secado y la oxidación parcial, la gasificación es mucho más eficiente que los procesos actuales de conversión de energía, como la combustión directa de desechos agrícolas, que el país utiliza a pequeña escala [20, 21]. El principal producto obtenido de la gasificación es el gas de síntesis que, a su vez, puede utilizarse como biocombustible para generar calor o electricidad [21]. Además, cuando el aire es el agente gasificante, el gas de síntesis tiene un poder calorífico inferior (PCI) promedio que es mucho menor que el del gas natural (aproximadamente una sexta parte de este) [22], pero todavía se puede utilizar en motores de combustión interna.

Hoy en día, la biomasa leñosa es uno de los materiales más estudiados para la conversión de bioenergía, dada su composición química y bajo contenido de humedad, lo que proporciona una buena eficiencia de gasificación [23-25]. Para Colombia esto no es diferente. De hecho, al estudiar el potencial bioenergético del país, se identifica un subtipo de biomasa leñosa que debería estudiarse más a fondo: el espinillo (*Ulex europeaus*). Esta es una especie de planta arbustiva introducida desde Europa que actualmente

se clasifica como invasora. Además de ser una amenaza para las especies endémicas, es altamente inflamable y se propaga muy fácilmente a sus alrededores [26, 27]. En 2019, un área de 386.931 ha se vio afectada por el espinillo, y un área de 1.717.815 ha en las regiones de Cundinamarca y Boyacá se encuentra en riesgo de ser afectada en el futuro [26, 28]. Por lo tanto, aprovechar esta planta como fuente de energía ayudaría simultáneamente a la disposición de estas biomásas mientras se genera bioenergía.

El estudio calcula el potencial energético de gasificación del espinillo y otras biomásas en Colombia. Este, enfoca la utilización de la biomasa generada en el campo y la industria como residuos, junto con un análisis de la producción de los principales productos agroindustriales y forestales del país; cabe destacar que las fluctuaciones en la cantidad de producto producido por año se explicaron al considerar los valores pico y valle durante un periodo de cinco años. Los materiales de biomasa seleccionados para este estudio se eligieron considerando su disponibilidad y si podían ser gasificados eficientemente. La gasificación fue elegida como una tecnología adecuada para convertir eficientemente la biomasa en un gas combustible porque es fácil de manejar y se puede utilizar para producir electricidad si un motor de combustión interna convencional es acoplado a un generador eléctrico. Los resultados de este estudio muestran que el potencial energético calculado para la biomasa de Colombia podría satisfacer una gran parte de la demanda eléctrica del país usando biomásas como estípites de palma de aceite, hojas de palma de aceite, madera de café y espinillo, que a menudo son recursos infravalorados.

Materiales y métodos

El presente estudio tiene tres propósitos principales: (1) evaluar el potencial de las biomásas que no tiene un uso definido actual o cuyo valor para los procesos de producción de energía se ha pasado por alto; (2) ofrecer resultados confiables que puedan validarse mediante conversaciones con representantes de gremios, empresas y agencias gubernamentales relacionadas con los procesos de generación de biomasa; y (3) enmarcar las biomásas elegidas como fuentes de valor, específicamente cuando se transforman a través de la gasificación.

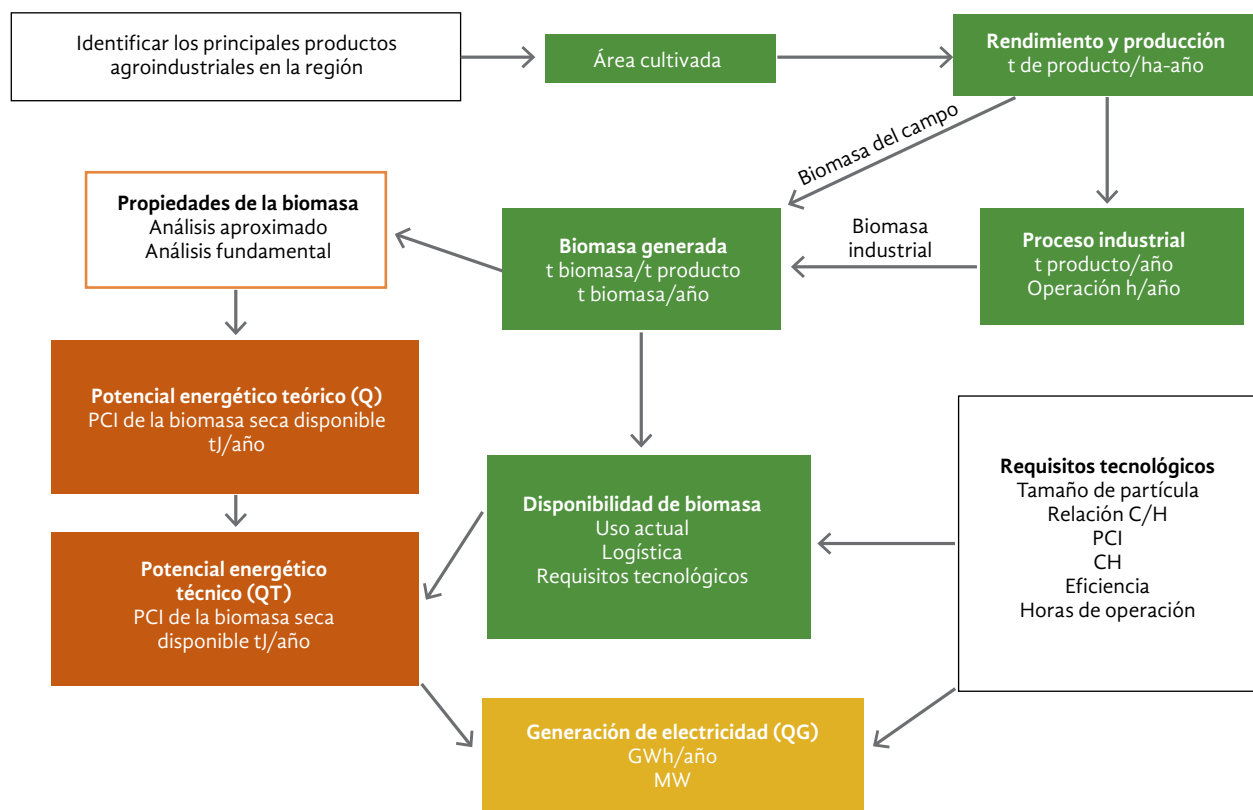
El primer paso para estimar el potencial energético en esta área requirió estudiar la biomasa más co-

mún generada en Colombia (es decir, enfocarse en los principales productos agrícolas del país (aceite de palma, caña de azúcar, plátano y banano)). Posteriormente, se midieron propiedades tales como el contenido de humedad (CH) y el poder calorífico inferior (PCI) de cada biomasa para excluir aquellas que estuvieran por fuera del intervalo utilizable recomendado para la gasificación [19]. También se estudiaron los cultivos que obtienen productos particularmente valiosos y generan una alta proporción de residuos con respecto al producto final, como el café y el cacao. Además, se consideraron los residuos forestales como una posible fuente de biomasa. Sin embargo, cabe señalar que el estudio se centró exclusivamente en la madera en bruto industrial procesada en aserraderos, que representa solo 27 % de la biomasa generada por el sector forestal [29]. La razón de esta elección fue que, además de ser mucho más difícil y costosa de recolectar, la biomasa forestal restante no se puede gasificar de forma tan eficiente como la de madera en bruto. Finalmente, se evaluó el potencial energético del espinillo, una especie invasora con una rápida tasa de expansión que actualmente amenaza la biodiversidad local [26].

Al identificar las biomásas relevantes para este estudio, se aplicó la metodología presentada en la Figura 1. En primer lugar, se tuvo que encontrar más información sobre las biomásas elegidas. Los datos de producción y rendimiento utilizados se tomaron de bases de datos nacionales [12]. Con el fin de tener en cuenta las posibles fluctuaciones de la producción a lo largo del tiempo, se analizaron los datos de producción durante cinco años (Apéndice A). Se eligió trabajar con los del periodo 2015-2019 porque, en Colombia, en 2014 se comenzó a recolectar una cantidad creciente de información precisa en esta área después de que se realizó el tercer Censo Nacional Agropecuario. Así, al analizar los datos en un periodo de tiempo significativo, se pudo estimar el potencial energético mínimo y máximo para cada biomasa, lo que, a su vez, permitió proponer diferentes escenarios posibles para implementar la gasificación.

La información sobre la relación residuo/producto final de cada biomasa provino de una revisión de las estadísticas gubernamentales y los informes oficiales de los gremios para cada producto. Los usos actuales, la logística y la dispersión espacial de cada biomasa vinieron de informes oficiales y trabajos de investigación nacionales e internacionales. Las pro-

Figura 1. Metodología del potencial energético de la biomasa



propiedades fisicoquímicas de cada biomasa se tomaron de fuentes locales cuando estaban disponibles y de la investigación internacional cuando era necesario. Finalmente, se midió el PCI y el CH de troncos y hojas de palma de aceite siguiendo las normas ASTM D3172 y ASTM D5142. Todos los datos recopilados se discutieron con representantes colombianos de las cadenas de producción generadoras de biomasa, quienes confirmaron su validez para cada una de ellas. Posteriormente, se estimó el potencial energético de cada una, lo que obligó a determinar sus usos actuales y las prácticas de eliminación. Esto se logró a través de revisiones adicionales de la literatura, entrevistas con líderes gremiales y expertos en productos, y trabajo de campo; así, se estimó la disponibilidad de cada biomasa, lo que permitió determinar el potencial energético tanto teórico como técnico.

Finalmente, para estimar la cantidad potencial de electricidad que se podría generar a través de la gasificación en Colombia, se propuso una hipotética planta de gasificación con un factor de uso de 85 %

(7.446 h por año). El factor de eficiencia de gasificación utilizado en este cálculo se basó en la cantidad de gas de síntesis generado por cada biomasa, así como su PCI, por lo tanto, la eficiencia promedio de conversión de biomasa en energía se estableció entre el 60-65 % [30], siguiendo estudios de gasificación previos. La eficiencia de convertir el gas de síntesis en electricidad se determinó, a su vez, en un 37 % (si se utiliza un motor de combustión interna en el proceso) [31].

Cálculos matemáticos

En la siguiente sección se presentan las ecuaciones utilizadas para calcular el potencial energético teórico y técnico, así como el potencial energético de gasificación de cada biomasa.

Para calcular la cantidad de biomasa producida (B) de una región, debe tenerse en cuenta su producción principal anual de biomasa (P) y su relación residuo/

producto final (R) [Ecuación (1)]. El subíndice i representa el producto de referencia y j representa el tipo de biomasa generada en su producción.

Ecuación 1

$$B_{ij} = P_i \cdot R_j$$

Para el caso específico del espinillo, las áreas afectadas (a) reportadas por la CAR fueron el punto de partida. Luego, se estimó su factor de producción (F) (según lo recomendado por las entidades públicas encargadas de administrar los territorios afectados por esta especie) como la cantidad de biomasa sobre el suelo por unidad de área. Además, para la Ecuación 2 se contabilizó un periodo de renovación (PR) (es decir, el tiempo necesario para que las plantas alcancen una altura promedio de 1,5-2 m).

Ecuación 2

$$B_{\text{espinillo}} = \frac{a \cdot F}{RP}$$

Para calcular el potencial energético teórico (Q) de cada biomasa, se tuvieron en cuenta tanto B como sus propiedades fisicoquímicas particulares. Sin embargo, cabe señalar que solo la materia seca es relevante para los cálculos de potencial energético, por lo que fue necesario incluir el PCI y el CH en la Ecuación 3.

Ecuación 3

$$Q_{ij} = B_{ij} \cdot (1 - CH_j) \cdot PCI_j$$

El factor de disponibilidad (A) de una biomasa dada es crucial para estimar su potencial energético técnico (QT) (Ecuación 4). La mayoría de las biomásas generadas en el campo tienen un A de 0,5, ya que se recomienda que al menos la mitad del residuo de biomasa de un cultivo se deje en el campo para proteger la calidad del suelo y preservar sus niveles de humedad y materia orgánica.

Ecuación 4

$$QT_{ij} = Q_{ij} \cdot A$$

A continuación, se calculó su potencial de gasificación (QG) en función de las horas anuales de operación de la planta de generación (H), la eficiencia de gasificación (E) y la eficiencia del motor-generator (n) (Ecuación 5).

Ecuación 5

$$QG_{ij} = QT_{ij} \cdot H \cdot E \cdot n$$

Por último, para calcular el potencial energético total de una región concreta hay que sumar todos los potenciales energéticos mencionados (Ecuación 6).

Ecuación 6

$$\bar{Q} = \sum Q_{ij}; \bar{QT} = \sum QT_{ij}; \bar{QG} = \sum QG_{ij}$$

Resultados

La Tabla 1 relaciona cada biomasa con la industria que la produce y/o el producto que la genera. Además, se muestra la relación de residuo a producto final y la producción máxima y mínima de cada producto de referencia.

Las propiedades fisicoquímicas de cada biomasa, que luego se utilizaron para calcular su potencial energético, se presentan en la Tabla 2.

El potencial teórico de cada biomasa se calculó usando las Ecuaciones 1-3. El potencial técnico de cada biomasa se calculó usando la Ecuación 4 (es decir, multiplicando el potencial teórico de cada biomasa por su factor de disponibilidad). El potencial de gasificación de cada biomasa se calculó con la Ecuación 5 (es decir, incluyendo las horas de operación de la planta de gasificación y la eficiencia del proceso de gasificación). El potencial energético total de Colombia se calculó utilizando la Ecuación 6. Los principales resultados se muestran en la Tabla 3. Además, la cantidad de biomasa disponible (AB), que se obtuvo multiplicando la Ecuación 1 por A, se presenta para relacionar los datos de potencial energético de cada biomasa con su producción y disponibilidad anuales. Cabe señalar que los datos se presentan como rangos, dado que se decidió tener en cuenta las fluctuaciones en la producción de biomasa al considerar las temporadas de producción pico y llano. Además, para tener en cuenta las posibles variaciones durante el proceso de gasificación, se calculó el potencial energético de gasificación de cada biomasa con un rango de eficiencia del 60-65 %. En la Tabla 3 QG presenta un intervalo de potencial de gasificación para cada biomasa. El extremo inferior del rango indica la energía potencial que podría producirse en una situación en la que la biomasa disponible y la eficiencia de gasificación

Tabla 1. Cantidades de producto de referencia y relaciones de residuo a producto final de cada biomasa generada.

Industria	Producto de referencia	P (kt/Año)	Biomasa	R (t br/t producto)
Palma de aceite ^a	Racimos de fruta fresca	5.612,3-7.172,8	Racimos de fruta vacíos	0,23
			Almendra de palma	0,06
			Fibra del mesocarpio	0,12
			Troncos de palma de aceite	0,51
			Hojas de palma de aceite	1,08
Caña de azúcar ^b	Azúcar en bruto	2.118,5-2.371,2	Puntas y hojas	2,4
			Bagazo de caña de azúcar	2,5
Caña de azúcar (p) ^c	Panela	1.098,2-1.183,4	Puntas y hojas (p)	3,7
			Bagazo de caña de azúcar (p)	2,5
Café ^d	Café verde	813,4-885,1	Cáscaras de café	0,38
			Madera de café	0,34
Arroz ^e	Arroz con cáscara verde	1.988,2-2.591,7	Cáscara de arroz	0,23
			Paja de arroz	1,43
Cacao ^f	Granos de cacao secos	54,8-60,5	Vainas de cacao	8
			Cáscaras de cacao	0,12
Banano ^g	Banano fresco	1.997,4-2.238,3	Pinzote de banano	1
			Seudotallo de banano	5
Plátano ^g	Plátano fresco	3.542,4-4.805,6	Pinzote de plátano	1
			Seudotallo de plátano	5
Coco ^h	Coco fresco	122,8-153,8	Exocarpio de coco	0,18
			Endocarpio de coco	0,12
			Fibra de coco	0,12
Silvicultura ⁱ	Madera de aserradero en bruto	536,5-883,7	Residuos de silvicultura	0,38
			Residuos de aserradero	0,34
Especies invasoras ^j	Espinillo	4.546,4	Biomasa de espinillo	1

^a Los datos de producción de palma de aceite se tomaron del Anuario Estadístico [32]; las proporciones de residuos de biomasa con respecto al producto de referencia se tomaron de la literatura local [33, 34]. ^b Los datos de producción de caña de azúcar se tomaron de [35]; sus proporciones de residuos con respecto al producto de referencia se obtuvieron directamente de Cenicaña. Se consideró una relación de azúcar a caña de azúcar de 10 %. ^c Los datos de producción de panela se tomaron de [36]; sus relaciones residuo/producto de referencia y disponibilidad se obtuvieron directamente de Fedepanela, sobre la base de un estudio anterior [13]. ^d Los datos de producción de café se tomaron de [37]; sus ratios residuo/producto de referencia se tomaron de estudios publicados por Cenicafé [24, 38]. ^e Los datos de producción de arroz se tomaron de [12]; sus ratios residuo/producto de referencia se tomaron de [39, 40]. ^f Los datos de producción de cacao se tomaron de [41]; sus ratios residuo/producto de referencia se obtuvieron de [42]. ^g Los datos de producción de banano y plátano se tomaron de los informes de la organización de productores de plátanos [41,43]; sus ratios residuo/producto de referencia se obtuvieron de [13, 16]. ^h Los datos de producción de coco se tomaron de [41]; sus ratios residuo/producto de referencia se obtuvieron de [44, 45]. ⁱ Los datos de producción de madera fueron tomados de [29]; sus ratios residuo/producto de referencia se obtuvieron de [13, 17]. Se determinó que la biomasa del espinillo que puede obtenerse por hectárea era de 23,48 t, después de los informes de certificación de eliminación final de WELTNEU. Se estimó que el periodo de renovación para el espinillo (es decir, el tiempo que tarda en alcanzar una altura de 2 m) era de 2 años.

Tabla 2. Propiedades fisicoquímicas y factores de disponibilidad de diferentes biomasas.

Biomasa	CH [%]	PCI [MJ/kg]	A [Disponible t/t]
Racimos de fruta vacíos ^a	66	15,7	0,83
Cáscara de la almendra de palma ^a	12	19,1	0,05
Fibra del mesocarpio ^a	38	17,42	0,12
Troncos de palma de aceite ^a	50	12,33	0,5
Hojas de palma de aceite ^a	45	20,09	0,5
Puntas y hojas ^b	30	16,9	0,5
Bagazo de caña de azúcar ^b	50	17,93	0
Puntas y hojas (p) ^b	30	16,9	0,5
Bagazo de caña de azúcar (p) ^b	50	17,93	0
Residuos de silvicultura ^c	40	19,3	0,2
Residuos del aserradero ^c	13	19	0,2
Espinillo ^d	45	19,04	1
Cáscaras de café ^e	10	18,3	0
Madera de café ^e	13	17,4	0,5
Cáscara de arroz ^f	13,1	18,4	0
Paja de arroz ^f	11,7	14,9	0,5
Vainas de cacao ^g	85	15,5	1
Cáscaras de cacao ^g	6,7	17,3	1
Raquis de banano ^h	91	7,6	0,5
Seudotallo de banano ^h	93	9,91	0,5
Raquis de plátano ^h	91	7,57	0,5
Seudotallo de plátano ^h	93	8,5	0,5
Exocarpio de coco ⁱ	85	14,7	0,5
Endocarpio de coco ⁱ	10,5	19,1	1
Fibra de coco ⁱ	13,5	16,7	0

^a Las propiedades fisicoquímicas de estos residuos industriales se tomaron de [33]; los autores de este estudio midieron el PCI y el CH de troncos y hojas de palma de aceite. El factor de disponibilidad de las biomasas de palma de aceite se tomó de [46]. ^b Las propiedades fisicoquímicas de estos residuos industriales se tomaron de [47, 48]. Su factor de disponibilidad se obtuvo directamente de representantes y organizaciones gremiales (Cenicaña y Fedepanela). ^c Las propiedades fisicoquímicas de estos residuos industriales se tomaron de [16, 17, 49]. Su factor de disponibilidad se obtuvo de representantes gremiales y de la empresa, y se confirmó además en el campo (Fedemadera, Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia). ^d Las propiedades fisicoquímicas del espinillo se tomaron de [27, 50]. Su factor de disponibilidad es igual a 1 debido a la naturaleza de la biomasa y a la forma en que se elimina. ^e Las propiedades fisicoquímicas de estos residuos industriales se tomaron de [24, 38, 49]. Su factor de disponibilidad se estimó de conformidad con las recomendaciones formuladas por representantes de Cenicafé. ^f Las propiedades fisicoquímicas de estos residuos industriales se tomaron de [40, 51]. Su factor de disponibilidad se estimó de acuerdo con las recomendaciones formuladas por los representantes de la industria. ^g Las propiedades fisicoquímicas de estos residuos industriales se tomaron de [42, 52]. ^h Las propiedades fisicoquímicas de estos residuos industriales se tomaron de [13]. Su factor de disponibilidad se estimó de acuerdo con las recomendaciones formuladas por los representantes de la industria. Las propiedades fisicoquímicas de estos residuos industriales se tomaron de [44,45].

Tabla 3. Total de biomasa producida, su cantidad disponible y su potencial energético.

Biomasa	PB [kt/Año]	AB [kt/Año]	Q [TJ/año]	QT [TJ/Año]	QG [MW]
Racimos de fruta vacíos	1.290,8-1.649,7	1.071,4-1.369,3	6.890,4-8.806,3	5.719,0-7.309,2	47,4-65,6
Cáscara de la almendra de palma	336,7-430,4	16,8-21,5	5.659,9-7.233,6	283,0-361,7	2,3-3,2
Fibra del mesocarpio	673,5-860,7	80,8-103,3	7.273,8-9.296,3	872,9-1.115,6	7,2-10,0
Troncos de palma de aceite	2.862,3-3.658,1	1.431,1-1.829,1	17.645,8-22.552,3	8.822,9-11.276,1	73,1-101,2
Hojas de palma de aceite	6.061,2-7.746,6	3.030,6-3.873,3	66.973,8-85.595,9	33.486,9-42.798,0	277,3-384,0
Puntas y hojas	5.084,4-5.690,9	2.542,2-2.845,4	60.149,0-67.323,0	30.074,5-33.661,5	249,1-302,0
Bagazo de caña de azúcar	5.296,3-5.928,0	0,0	47.481,3-53.144,5	0,0	0,0
Puntas y hojas (p)	4.063,4-4.378,5	2.031,7-2.189,2	48.069,6-51.797,4	24.034,8-25.898,7	199,1-232,4
Bagazo de caña de azúcar	2.745,5-2.958,4	0,0	24.613,5-26.522,3	0,0	0,0
Residuos de silvicultura	203,9-335,8	40,8-67,2	2.361,0-3.888,5	472,2-777,7	3,9-7,0
Residuos del aserradero	182,4-300,4	36,5-60,1	3.015,5-4.966,4	603,1-993,3	5,0-8,9
Espinillo	4.546,4	4.546,4	47.610,3	47.610,3	394,3-427,2
Cáscaras de café	187,1-203,6	0,0	3.081,3-3.352,9	0,0	0,0
Madera de café	2.928,3-3.186,4	1.464,2-1.593,2	44.328,8-48.236,2	22.164,4-24.118,1	183,6-216,4
Cáscara de arroz	357,9-466,5	0,0	5.722,2-7.459,1	0,0	0,0
Paja de arroz	2.843,1-3.706,1	1.421,6-1.853,0	37.405,9-48.759,6	18.702,9-24.379,8	154,9-218,7
Vainas de cacao	438,4-484,3	438,4-484,3	1.019,2-1.126,0	1.019,2-1.126,0	8,4-10,1
Cáscaras de cacao	6,6-7,3	6,6-7,3	106,1-117,3	106,1-117,3	0,9-1,1
Raquis de banano	1.997,4-2.238,3	998,7-1.119,2	1.366,2-1.531,0	683,1-765,5	5,7-6,9
Seudotallo de banano	9.987,0-11.191,6	4.993,5-5.595,8	6.927,9-7.763,6	3.464,0-3.881,8	28,7-34,8
Raquis de plátano	3.542,4-4.805,6	1.771,2-2.402,8	2.413,4-3.274,1	1.206,7-1.637,0	10,0-14,7
Seudotallo de plátano	17.711,8-24.028,1	8.855,9-12.014,1	10.538,5-14.296,7	5.269,2-7.148,4	43,6-64,1
Exocarpio de coco	22,1-27,7	11,0-13,8	48,7-61,1	24,4-30,5	0,2-0,3
Endocarpio de coco	14,7-18,5	14,7-18,5	251,8-315,6	251,8-315,6	2,1-2,8
Fibra de coco	14,7-18,5	0,0	212,8-266,7	0,0	0,0
Total	73.398,2-88.866,4	34.804,1-42.006,7	451.166,8-525.296,4	204.871,5-235.321,9	1.696,7-2.111,3

estaban en su punto más bajo; el extremo superior del rango presenta el mismo rango de potencial energético en una situación en la que la biomasa disponible y la eficiencia de gasificación estaban en su punto más alto.

En el primer escenario (es decir, baja producción y eficiencia), el potencial energético técnico calculado fue de 451,2 PJ/año, el potencial energético técnico total fue de 204,8 PJ/año y, finalmente, el potencial de gasificación total fue de 1.696,7 MW de electricidad. En el segundo escenario (es decir, alta producción y eficiencia), el potencial energético calculado era de 525,3 PJ/año, el potencial energético técnico total era de 235,3 PJ/año y, por último, el potencial total de gasificación era de 2.111,3 MW de electricidad. Además, en un escenario de baja producción y alta eficiencia, el potencial total de gasificación sería de 1.948,9 MW, mientras que, en un escenario de alta producción y baja eficiencia, este potencial sería de 1.831,1 MW. A continuación, sin embargo, nos centraremos en los 2 primeros escenarios, ya que nos permiten establecer el rango de potencial energético más amplio posible para las biomásas evaluadas.

La principal diferencia entre el potencial energético teórico y el técnico en ambos escenarios se atribuye al factor de disponibilidad de cada biomasa. Trabajar con factores de disponibilidad estrictos garantiza que no habrá usos contradictorios para cada biomasa producida (por ejemplo, los residuos necesarios para proteger y enriquecer el suelo de un campo no se utilizarán para la producción de energía). La Figura 2 presenta una visión general del potencial energético técnico estimado para el país.

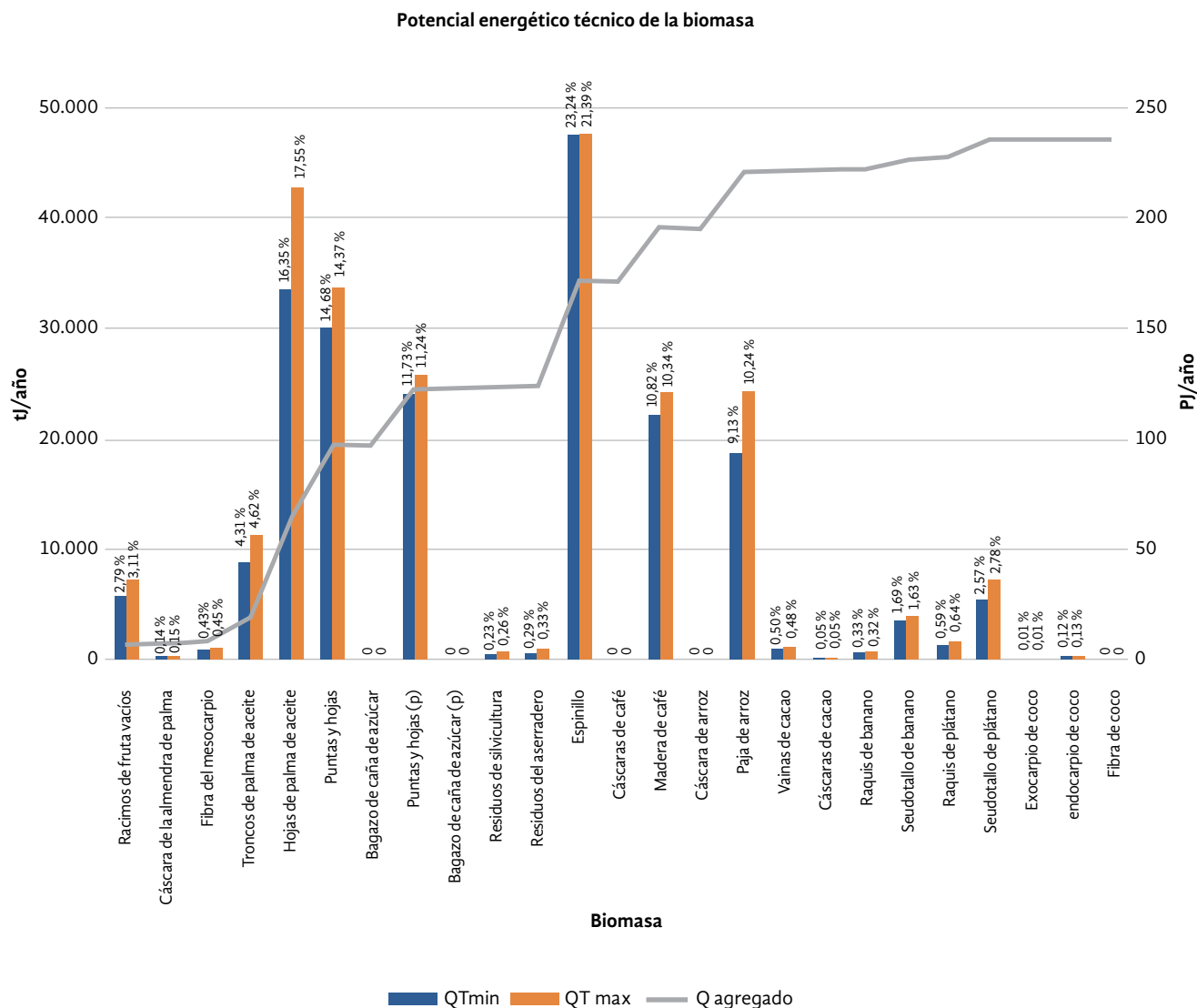
Por lo tanto, en general, el espinillo resultó tener el mayor potencial energético técnico en ambos escenarios (20,23-23,23 %), seguido de las hojas de palma de aceite (16,34-18,18 %), las puntas y hojas de caña de azúcar (14,30-14,67 %), las puntas y hojas de caña de azúcar (p) (11,00-11,73 %), la madera de café (10,25-10,85 %) y los estípites de palma de aceite (4,30-4,79 %). Cabe señalar que las biomásas con un potencial energético igual a 0, como el bagazo de la caña de azúcar y las cáscaras de café, también tenían un factor de disponibilidad de 0. Esto se debe a que ya se están transformando en energía, aunque no en plantas de gasificación. Dado que el consumo de energía de Colombia se encuentra en alrededor de 1.336 PJ/año y el potencial energético técnico total del país se estimó en 204,9-235,3 PJ/año, el 15,3-17,6 % de esta demanda de energía podría ser

abastecida por biomasa si hubiera una técnica de transformación cuya eficiencia fuera del 100 %. Por otro lado, si se eligiera la gasificación como la técnica de transformación para convertir todas las biomásas disponibles en energía, se podría suministrar 3,69-4,24 % de la demanda total de energía del país, ya que el potencial total de gasificación de estas biomásas es de 1.696,7-2.111,3 MW (49,3-56,6 PJ/año). Cabe señalar que el espinillo por sí solo podría abastecer el 3,6 % de la demanda nacional de energía si pudiera convertirse en energía con un 100 % de eficiencia. Sin embargo, siendo realistas, si la gasificación fuera la técnica de transformación elegida, esta especie invasora sería capaz de abastecer el 0,88 % de esa demanda, dado que su potencial de gasificación es de 427,2 MW (11,5 PJ/año). Además, el potencial energético total de gasificación calculado en este estudio para cada escenario, que fue de 12.633,7-15.720,8 GWh (1.696,7-2.111,3 MW), podría suministrar 74,34-92,51 % de los 16.994 GWh de la electricidad consumida en el país.

El potencial energético de gasificación del espinillo solo podría abastecer el 17,28-18,72 % de la demanda eléctrica nacional, ya que equivale a 2.935,97-3.180,63 GWh (394,3-427,2 MW).

El potencial energético teórico estimado para la mayoría de las biomásas agrícolas es similar a los valores reportados en estudios previos [13-15], sin embargo, en el caso de la caña de azúcar, el café, el arroz, el banano y el plátano hubo algunas ligeras variaciones que se atribuyeron a los diferentes valores de CH y PCI, utilizados en el presente estudio. Además de los cambios mencionados en las propiedades fisicoquímicas, se incluyó una nueva variable en la estimación del potencial energético de la industria del aceite de palma. Es así como se consideró el potencial energético de los residuos de campo (es decir, estípites y hojas de palma de aceite), lo que causó variaciones significativas entre los valores de potencial energético final obtenidos para esta industria, que, en comparación con estudios anteriores, se centró en la biomasa que podría obtenerse del procesamiento industrial del fruto. El potencial energético forestal estimado en este estudio también resultó ser diferente al recogido en trabajos anteriores [13,16], muy probablemente como consecuencia de los límites que se aplicaron a la investigación, que se centran en la madera en bruto procesada en aserraderos.

Figura 2. Máximo (naranja) y mínimo (azul) potencial energético técnico de la biomasa colombiana y valor agregado del potencial energético técnico (gris).



Discusión

Este estudio presentó el potencial energético de la biomasa colombiana, teniendo en cuenta las posibles variaciones en la producción agrícola y forestal, lo que afecta directamente la disponibilidad de la misma. Además, se consideraron las posibles variaciones de eficiencia en el proceso de gasificación. Es importante señalar que se establecieron los escenarios centrándose en los valores de las propiedades que son

más susceptibles a las fluctuaciones. La producción de biomasa y la eficiencia de la gasificación pueden variar por muchas razones, mientras que las propiedades fisicoquímicas y las relaciones de residuo a producto final de cada biomasa permanecen bastante estables a medida que pasa el tiempo.

Colombia es un país con gran potencial para generar energía a partir de biomasa debido a la alta producción de esta última en varias industrias. Además,

debido a su naturaleza leñosa, alto PCI y producción centralizada, algunas de estas biomásas son particularmente aptas para la conversión en energía a través de la gasificación. De hecho, los residuos de estas industrias pueden utilizarse para satisfacer sus propias demandas de energía o para producir electricidad que se venderá en el mercado. Incluso en industrias en las que ya se aplican ampliamente otros métodos de transformación, como la combustión en la industria de la caña de azúcar, la investigación sobre la gasificación podría seguir siendo fructífera. Ciertamente, las puntas y hojas de la caña de azúcar no se utilizan convencionalmente como recurso energético viable; por ello, presentar como alternativa una tecnología más eficiente, como la gasificación, puede aumentar su valor y el interés de la industria.

Por otro lado, el potencial energético estimado para biomásas producidas a menor escala, como las vainas de cacao, es comparable al potencial de residuos generados a escalas mucho mayores, como los que se dan en las industrias de la caña de azúcar y el aceite de palma; por lo tanto, aprovechar el potencial energético de los residuos a pequeña escala puede permitir a los agricultores abastecer sus propias necesidades energéticas. También pueden ser un motor para la sustitución de los combustibles fósiles. Teniendo esto en cuenta, y considerando los costos relativamente elevados asociados a la instalación y explotación de plantas de gasificación, es crucial encontrar formas de garantizar la rentabilidad de esta práctica para hacerla más accesible. De hecho, la aplicación de estrategias como la creación de asociaciones de productores agrícolas, la instalación de plantas regionales y los incentivos fiscales establecidos por el gobierno pueden ayudar a que la gasificación encuentre su lugar como tecnología de generación de energía sostenible en Colombia.

Del mismo modo, el potencial energético estimado para el espinillo es comparable al de algunas biomásas generadas en la agroindustria a gran escala. Por lo tanto, este material podría revalorizarse y convertirse en una fuente temporal o permanente de bioenergía. Es evidente que replantar parcialmente una especie invasora como fuente de biomasa para la generación de energía podría interferir en su erradicación definitiva; sin embargo, aprovechar el potencial energético de tales especies exige, como mínimo, regular su propagación, lo que atacaría algunos de los problemas ecológicos que está causando en la actualidad, aunque no conduzca a una solución

completa. Además, el resultado exacto de la combinación de incentivos económicos y la necesidad de resolver problemas ecológicos no siempre es sencillo. De hecho, existen varios escenarios imaginables que podrían tener lugar si se llevara a cabo la gasificación del espinillo.

Teniendo esto en cuenta, se presentan dos posibilidades, una que prioriza la sostenibilidad económica y otra que privilegia las preocupaciones ecológicas. La primera requiere recolectar la totalidad de la biomasa de espinillo disponible en las regiones afectadas y su posterior transformación en energía. Posteriormente, estas zonas podrían ser objeto de un seguimiento minucioso para garantizar la erradicación completa de la especie invasora. En este caso, los beneficios de vender la energía producida serían limitados, ya que el suministro de biomasa no se regeneraría constantemente. Esto tal vez significaría que la venta de bioenergía no sería suficiente para recuperar las inversiones iniciales; sin embargo, las plantas de gasificación establecidas para este propósito podrían reutilizarse para convertir otros tipos de biomasa una vez que se erradique el espinillo. Además, el beneficio ecológico que esto produciría es invaluable. El segundo escenario consiste en recolectar regularmente una parte de la biomasa de espinillo disponible para convertirla en energía; en consecuencia, se controlaría la propagación de las especies invasoras al tiempo que se garantizaría un suministro constante de biomasa y sostenibilidad económica a largo plazo. Además, a pesar del daño que causa, el espinillo ha demostrado ser capaz de proporcionar algunos servicios ecosistémicos, como la prevención de la erosión y la retención de la humedad del suelo. De hecho, a pesar de que los servicios antes mencionados, a menudo son menos significativos que los proporcionados por los biomasas nativos, trabajar con una cantidad limitada de espinillo puede ser muy útil en algunos ecosistemas donde el agua es escasa y el suelo es bajo en nutrientes [26]. En entornos controlados, estos servicios podrían aprovecharse adecuadamente al tiempo que se mantienen los daños al mínimo.

Además, las biomásas generadas en el campo tienen el mayor potencial energético cuando se considera su disponibilidad y la escala a la que se producen; sin embargo, aprovechar al máximo este potencial tiene algunos desafíos asociados con el transporte, la recolección y su almacenamiento. Pero, como muestra este estudio, sus potenciales de energía

pueden hacer que valga la pena afrontar tales desafíos y encontrar soluciones, como la densificación; dichas tecnologías aumentarían la rentabilidad de su gasificación. Además, este potencial puede subir aún más en el futuro debido a la optimización de la eficiencia de la gasificación, o un aumento en la producción de biomasa. El factor de disponibilidad de las biomásas generadas en el campo se estableció en 50 %, ya que el suelo requiere que una parte de esa biomasa sea mantillo para mantenerse saludable; sin embargo, este número proviene de observaciones no sistemáticas de los agricultores y tal vez podría hacerse más preciso para cada biomasa en cada caso particular. Al verificar los requisitos del suelo de la granja y cultivo, solo se podría dejar en el suelo la cantidad absolutamente necesaria de biomasa, lo que aumentaría su factor de disponibilidad para la gasificación y permitiría a los agricultores extraer más valor de ella.

Además, los gremios y centros de investigación pueden utilizar los resultados de este estudio como un trampolín para aprovechar el potencial de los materiales a menudo pasados por alto. El desarrollo de planes y conocimientos que promuevan la implementación de tecnologías de transformación de biomasa puede resultar útil en un futuro próximo. Aunque este análisis se centró en la gasificación como una tecnología de producción de energía viable, aquí el potencial técnico encontrado para cada una de las biomásas evaluadas se puede aprovechar mediante el uso de otras tecnologías para producir electricidad o calor.

La crisis climática mundial, que probablemente se intensificará en los próximos años, también hace que la investigación sobre la gasificación y otros métodos de transformación de la biomasa sea una necesidad. Incluso si las plantas hidroeléctricas son, a largo plazo, una alternativa de bajo costo para producir energía renovable, estas son vulnerables a eventos como las sequías. Hoy en día, la generación de electricidad en Colombia depende casi por completo de la energía hidroeléctrica, por lo que sería prudente comenzar a diversificar las fuentes para mitigar los efectos negativos de los fenómenos climáticos futuros. Aunque la bioenergía también es vulnerable a las sequías, ni con la misma intensidad ni en la misma medida que la energía hidroeléctrica. Esto significa que la producción de bioenergía no necesariamente colapsaría o se vería afectada de manera importante si ocurriera lo mismo con las centrales hidroeléctricas de una región (lo contrario, por supuesto, también es cier-

to). Además, los cultivos a gran escala, como la caña de azúcar, muestran picos de producción durante los periodos secos en el país [53]. Lo más probable es que la energía suministrada sea insuficiente para compensar la escasez que produciría una planta hidroeléctrica que falla; sin embargo, es sensato diversificar las fuentes para reducir el impacto que tales eventos pueden causar con respecto a la disponibilidad de energía.

Finalmente, cabe mencionar que la precisión de los datos recopilados sobre la producción de biomasa y las propiedades fisicoquímicas de la biomasa es evidencia de los resultados fructíferos de los investigadores académicos, asociaciones gremiales y agencias gubernamentales que colaboran entre sí. Superar las relaciones desarticuladas entre la academia, el gobierno y las diversas industrias productivas de un país será crucial para el desarrollo y la implementación real de tecnologías que puedan contribuir a los esfuerzos actuales para combatir el cambio climático y al mismo tiempo aumentar la eficiencia de la producción industrial. Se pueden aplicar metodologías similares a cualquier región para ayudarla a avanzar hacia un suministro de energía más soberano y sostenible.

Conclusiones

El potencial energético de gasificación de varias biomásas actualmente no utilizadas en Colombia es significativo. De hecho, los datos muestran que 92,51 % de la demanda de electricidad del país podría satisfacerse, así como hasta 17,6 % de sus demandas totales de energía. Dado que la diversificación de las estrategias de producción de energía de un país lo hace más resistente a los efectos negativos del cambio climático, también es aconsejable implementar la gasificación. Además, el uso de esta tecnología requiere de materiales que de otro modo se descartarían, lo que puede ayudar a reducir las emisiones de CO₂. Por lo tanto, una implementación ambientalmente consciente de la gasificación podría ayudar a los países a cumplir sus compromisos de los ODS. Por estas razones, analizar la idoneidad de implementar la gasificación en diferentes regiones del mundo y optimizar sus condiciones operativas y logísticas, parece ser un camino sensato para futuras investigaciones sobre bioenergía.

Aportes de los autores: conceptualización, C. P. P.-R., C. S. D. G. y A. M.; análisis formal, C. P. P.-R., C. S. D. G. y A. M.; investigación, C. P. P.-R., L. A. R.,

C. S. D. G., A. M. y C. G.-M.; metodología, C. P. P.-R., C. S. D. G. y A. M.; administración de proyectos, C. P. P.-R. y C. G.-M.; recursos, C. S. D. G. y C. G.-M.; escritura, C. S. D. G. y A. M.; escritura, revisión y edición, C. P. P.-R., L. A. R., C. S. D. G., A. M. y C. G.-M. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Financiación: la investigación y los costos de procesamiento de artículos fueron financiados por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia (Minciencias), a través del Patrimonio Autónomo Fondo Nacional de Financiamiento para la Ciencia, la Tecnología y la Innovación, Fondo Francisco José de Caldas, número de subvención [80740-507-2020].

Declaración de la Junta de Revisión Institucional: no aplica.

Declaración de consentimiento informado: no aplica.

Declaración de disponibilidad de datos: no aplica.

Reconocimientos: los autores agradecen el apoyo del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia que financió el proyecto “Aprovechamiento del potencial energético de residuos agrícolas disponibles en Colombia para generar electricidad, a través de procesos termoquímicos de gasificación”, ganador de la Convocatoria “Conectando Conocimiento 852-2019”. También agradecen a la Universidad Nacional de Colombia como a la Universidad de Antioquia que hicieron posible el desarrollo de esta investigación. Se agradece especialmente a todos los representantes gremiales, agencias gubernamentales, expertos y miembros de la compañía que contribuyeron con información y experiencia al proyecto.

Conflicto de intereses: los autores declaran que no hay conflicto de intereses.

Apéndice A. Datos de producción agrícola y forestal (kt)

Producto de referencia	2015	2016	2017	2018	2019	μ	σ	Mín	Máx	cv
Palma de aceite	6.291,2	5.612,3	6.646,9	7.007,3	7.172,8	6.546,1	623,0	5.612,3	7.172,8	0,10
Caña de azúcar	2.371,2	2.118,5	2.233,8	2.335,4	2.204,0	2.252,6	102,0	2.118,5	2.371,2	0,05
Caña de azúcar (p)	1.168,3	1.101,3	1.166,6	1.183,4	1.098,2	1.143,6	40,5	1.098,2	1.183,4	0,04
Silvicultura	569,2 *	575,5	536,5	883,7	751,1	663,2	149,1	536,5	883,7	0,22
Café	850,5	823,9	851,6	813,4	885,1	844,9	28,0	813,4	885,1	0,03
Arroz	1.988,2	2.526,2	2.591,7	2.486,7	2.536,9	2.425,9	247,6	1.988,2	2.591,7	0,10
Cacao	54,8	56,8	60,5	56,9	59,7	57,7	2,4	54,8	60,5	0,04
Banano	1.997,4	2.001,5	2.120,7	2.125,2	2.238,3	2.096,6	100,5	1.997,4	2.238,3	0,05
Plátano	3.542,4	3.909,0	4.111,7	4.430,2	4.805,6	4.159,8	483,9	3.542,4	4.805,6	0,12
Coco	130,0	122,8	127,2	145,3	153,8	135,8	13,2	122,8	153,8	0,10

* Datos de 2020.

Referencias

1. Quaschning, V. *Renewable Energy and Climate Change*; John Wiley & Sons, Ltd.: Hoboken, NJ, USA, 2019.

2. UN. *The 2030 Agenda and the Sustainable Development Goals an Opportunity for Latin America and the Caribbean Thank You for Your Interest in This ECLAC Publication*; UN: San Francisco, CA, USA, 2018; ISBN 9789211220117.
3. Liu, Z.; Saydaliev, H.; Lan, J.; Ali, S.; Anser, M. Assessing the Effectiveness of Biomass Energy in Mitigating CO₂ Emissions: Evidence from Top-10 Biomass Energy Consumer Countries. *Renew. Energy* 2022, 191, 842-851. [CrossRef]
4. IEA. World Energy Balances. Disponible en línea: 1486495650 (consultado el 8 de agosto de 2002).
5. Pelkmans, L. *IEA Bioenergy Countries' Report-Update 2018: Bioenergy Policies and Status of Implementation*; IEA: París, Francia, 2018.
6. Albashabsheh, N.T.; Heier Stamm, J.L. Optimization of Lignocellulosic Biomass-to-Biofuel Supply Chains with Mobile Pelleting. *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.* 2019, 122, 545-562. [CrossRef]
7. Calero, D.; Chambi, C.; Majano, A. M.; Ubico, D.; Zevallos, P. *Hacia un Desarrollo Resiliente y Bajo en Emisiones en Latinoamérica y el Caribe-Reporte LEDSenLAC 2019*; Libélula: Toronto, ON, Canadá, 2019; ISBN 978-612-47127-1-5.
8. Toklu, E. Biomass Energy Potential and Utilization in Turkey. *Renew. Energy* 2017, 107, 235-244. [CrossRef]
9. Bilandzija, N.; Voca, N.; Jelcic, B.; Jurisic, V.; Matin, A.; Grubor, M.; Kricka, T. Evaluation of Croatian Agricultural Solid Biomass Energy Potential. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2018, 93, 225-230. [CrossRef]
10. Suzuki, K.; Tsuji, N.; Shirai, Y.; Hassan, M. A.; Osaki, M. Evaluation of Biomass Energy Potential towards Achieving Sustainability in Biomass Energy Utilization in Sabah, Malaysia. *Biomass Bioenergy* 2017, 97, 149-154. [CrossRef]
11. Ferreira, L. R. A.; Otto, R. B.; Silva, F. P.; De Souza, S. N. M.; De Souza, S. S.; Ando Junior, O. H. Review of the Energy Potential of the Residual Biomass for the Distributed Generation in Brazil. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2018, 94, 440-455. [CrossRef]
12. DANE. *Encuesta Nacional Agropecuaria 2019*; DANE: Maple Grove, MN, USA, 2020.
13. Escalante, H.; Orduz, J.; Zapata, H.; Cardona, M.; Duarte, M. *Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia. Reporte preparado para la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia*; la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME): Bogotá, Colombia, 2011; ISBN 9789588504599.
14. Gutiérrez, A. S.; Eras, J. J. C.; Hens, L.; Vandecasteele, C. The Energy Potential of Agriculture, Agroindustrial, Livestock, and Slaughterhouse Biomass Wastes through Direct Combustion and Anaerobic Digestion. The Case of Colombia. *J. Clean. Prod.* 2020, 269, 122317. [CrossRef]

15. González-Salazar, M. A.; Morini, M.; Pinelli, M.; Spina, P. R.; Venturini, M.; Finkenrath, M.; Poganietz, W. R. Methodology for Estimating Biomass Energy Potential and Its Application to Colombia. *Appl. Energy* 2014, 136, 781-796. [CrossRef]
16. Unidad de Planeación Minero Energética UPME. *Actualización y revisión de los balances energéticos nacionales de Colombia 1975-2009 Informe Final*; UPME: Bogotá, Colombia, 2011; Volumen 3.
17. UPME, UNAL *Estimación del potencial de conversión a biogás de la biomasa en Colombia y su aprovechamiento*; UPME: Bogotá, Colombia, 2018.
18. UPME. *Unidad de Planeación Minero Energética Plan Energético Nacional 2020-2050*; UPME: Bogotá, Colombia, 2015.
19. UPME Balance Energético Colombiano-BECO. Demanda y eficiencia energética. Recuperado de <https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Paginas/BECOEnergetico.aspx> (consultado el 12 de agosto de 2022).
20. Bain, R. L.; Broer, K. *Gasification*; Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2011; ISBN 9780470721117.
21. Sikarwar, V. S.; Zhao, M. *Biomass Gasification*; Elsevier: Ámsterdam, Países Bajos, 2017; Volumen 3, ISBN 9780128046777.
22. IDEA. *Biomasa: Gasificación*; IDAE: Madrid, España, 2007; ISBN 978-84-96680-20-3.
23. de Oliveira, J. L.; da Silva, J. N.; Martins, M. A.; Pereira, E. G.; da Conceição Trindade Bezerra e Oliveira, M. Gasification of Waste from Coffee and Eucalyptus Production as an Alternative Source of Bioenergy in Brazil. *Sustain. Energy Technol. Assess.* 2018, 27, 159-166. [CrossRef]
24. Tascón, C. E. O.; Uribe, J. R. S.; Valencia, N. R. Evaluación de un gasificador de flujo descendente utilizando astillas de madera de café. *Cenicafé* 2017, 68, 61-75.
25. Martínez, I.; Callén, M. S.; Grasa, G.; López, J. M.; Murillo, R. Sorption-Enhanced Gasification (SEG) of Agroforestry Residues: Influence of Feedstock and Main Operating Variables on Product Gas Quality. *Fuel Process. Technol.* 2022, 226, 107074. [CrossRef]
26. Cataño, J. B.; Contreras-Rodríguez, S. M.; Malambo-Duarte, N.; Cárdenas, A. M.; Ocampo, R.; Perdomo, D. R.; Rojas, J. *Plan de Prevención, Manejo y Control de las Especies de Retamo Espinoso (Ulex europaeus) y Retamo Liso (Genista monspessulana) En la Jurisdicción CAR*; CAR, Ed.; CAR: Bogotá, Colombia, 2019; ISBN 9789585480230.
27. Rojas, D. *Estudio de las Características del retamo espinoso (Ulex europaeus) localizado en los cerros orientales de la ciudad de Bogotá para su aprovechamiento como medida de minimización del impacto ambiental causado por su presencia*; Universidad Nacional Abierta y a Distancia: Bogotá, Colombia, 2020; Volumen 53.
28. Goyes, M. F. M.; Rubio, J.; Ocampo, R.; Cataño, J. I. B. *Catálogo de especies invasoras del territorio CAR*; Pontificia Universidad Javeriana, Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca-CAR: Bogotá, Colombia, 2015.

29. Fedemaderas. *Boletín Estadístico 2020*; Fedemaderas: Bogotá, Colombia, 2020.
30. Lee, S. Y.; Sankaran, R.; Chew, K. W.; Tan, C. H.; Krishnamoorthy, R.; Chu, D.-T.; Show, P.-L. Waste to Bioenergy: A Review on the Recent Conversion Technologies. *BMC Energy* 2019, 1, 4. [CrossRef]
31. Clarke-Energy Synthesis Gas/Syngas. Recuperado de <https://www.clarke-energy.com/applications/synthesis-gas-syngas/> (consultado el 8 de abril de 2022).
32. Fedepalma. *Anuario Estadístico 2019*; Fedepalma: Bogotá, Colombia, 2019.
33. García, J.; Yáñez, E.; Rodríguez, N.; Núñez, J. A. G.; Loh, S. K.; Ramírez-Contreras, N. E.; Arévalo, S. A.; García-Núñez, J. A.; Van Dam, J. Subproductos de la Palma de Aceite como Materias Primas de Biomasa. *Rev. Palmas* 2017, 141, 149-156. [CrossRef]
34. García, J. A.; Yáñez, A. E. E.; Cárdenas, M. M. M. Generación y uso de biomasa en plantas de beneficio de palma de aceite en Colombia. *Rev. Palmas* 2010, 31, 41-48.
35. Asocaña. *Producción 2000-2020*; Asocaña: Cali, Colombia, 2020.
36. Fedepanela. *Áreas, rendimiento y producción de caña panelera*; Fedepanela: Bogotá, Colombia, 2019.
37. FNC; SICA. *Precios área y producción de café*; FNC: Seúl, Corea, 2020.
38. Martínez, C. L. M.; Rocha, E. P. A.; Carneiro, A. D. C. O.; Gomes, F. J. B.; Batalha, L. A. R.; Vakkilainen, E.; Cardoso, M. Characterization of Residual Biomasses from the Coffee Production Chain and Assessment the Potential for Energy Purposes. *Biomass Bioenergy* 2019, 120, 68-76. [CrossRef]
39. Felfli, F. F.; Mesa, P. J. M.; Rocha, J. D.; Filippetto, D.; Luengo, C. A.; Pippo, W. A. Biomass Briquetting and its Perspectives in Brazil. *Biomass Bioenergy* 2011, 35, 236-242. [CrossRef]
40. Zhang, Y.; Wang, Q.; Li, B.; Li, H.; Zhao, W. Is There a General Relationship between the Exergy and HHV for Rice Residues? *Renew. Energy* 2018, 117, 37-45. [CrossRef]
41. MADR. *AGRONET. Estadísticas Agropecuarias*; MADR: Bucarest, Rumania, 2020.
42. Rojas, K. E.; García, M. C.; Cerón, I. X.; Ortiz, R. E.; Tarazona, M. P. Identification of Potential Maturity Indicators for Harvesting Cacao. *Heliyon* 2020, 6, e03416. [CrossRef]
43. Augura. *Coyuntura Bananera 2020*; Augura: Medellín, Colombia, 2020.
44. Mühlbauer, W.; Müller, J. Coconut. Cocos Nucifera L. En *Drying Atlas*, 1ra ed.; Elsevier: Amsterdam, Países Bajos; Woodhead Publishing: London, UK, 2020; pp. 143-150. [CrossRef]
45. AlNouss, A.; Parthasarathy, P.; Shahbaz, M.; Al-Ansari, T.; Mackey, H.; McKay, G. Techno-Economic and Sensitivity Analysis of Coconut Coir Pith-Biomass Gasification Using ASPEN PLUS. *Appl. Energy* 2020, 261, 114350. [CrossRef]

46. Núñez, J. A. G. Nuevos Conceptos para Biorrefinerías de Aceite de Palma. *Palmas* 2013, 34, 66-84.
47. de Souza Noel Simas Barbosa, L.; Hytönen, E.; Vainikka, P. Carbon Mass Balance in Sugarcane Biorefineries in Brazil for Evaluating Carbon Capture and Utilization Opportunities. *Biomass Bioenergy* 2017, 105, 351-363. [CrossRef]
48. Cardozo, E.; Erlich, C.; Alejo, L.; Fransson, T. H. Combustion of Agricultural Residues: An Experimental Study for Small-Scale Applications. *Fuel* 2014, 115, 778-787. [CrossRef]
49. Douglas Roque Lima, M.; Poliana Santos Patricio, E.; de Oliveira Barros Junior, U.; Reis de Assis, M.; Nogueira Xavier, C.; Bufalino, L.; Fernando Trugilho, P.; Ricardo Gherardi Hein, P.; de Paula Protásio, T. Logging Wastes from Sustainable Forest Management as Alternative Fuels for Thermochemical Conversion Systems in Brazilian Amazon. *Biomass Bioenergy* 2020, 140, 105660. [CrossRef]
50. 50. Núñez-Moreno, A.; Barbieri, G.; Gordillo, G. Analysis of the Feasibility of Generating Solid Biofuel from *Ulex Europaeus* Plants. *Rev. Fac. Ing.* 2020, 29, e10454. [CrossRef]
51. Biswas, B.; Pandey, N.; Bisht, Y.; Singh, R.; Kumar, J.; Bhaskar, T. Pyrolysis of Agricultural Biomass Residues: Comparative Study of Corn Cob, Wheat Straw, Rice Straw, and Rice Husk. *Bioresour. Technol.* 2017, 237, 57-63. [CrossRef] [PubMed]
52. Gil, M. V.; González-Vázquez, M. P.; García, R.; Rubiera, F.; Pevida, C. Assessing the Influence of Biomass Properties on the Gasification Process Using Multivariate Data Analysis. *Energy Convers. Manag.* 2019, 184, 649-660. [CrossRef]
53. Asocaña. *Más que azúcar, una fuente de energía renovable para el país-cogeneración*; Asocaña: Cali, Colombia, 2017.

Publicaciones de Cenipalma en otros medios

Publications by Cenipalma in other Media

En esta edición se comparte un trabajo realizado por investigadores de Cenipalma que fue publicado en un medio internacional

FEDEPALMA

Artículo

Interacciones antagónicas entre *Trichoderma* spp. y *Phytophthora palmivora* (Butler) de la palma de aceite en Colombia

Autores: Greicy Sarria, Alejandra García, Yuri Mestizo, Camilo Medina, Francia Varón, Eloína Mesa, Sebastián Hernández

Publicado en: *Eur J Plant Pathol* 161, 751-768 (2021). doi: 10.1007/s10658-021-02363-z

Resumen: La Pudrición del cogollo es la enfermedad más limitante en los cultivos de palma de aceite en Colombia. Adicional a implementar las estrategias de manejo actuales, es necesario buscar alternativas para el control de esta enfermedad. Este trabajo tuvo como objetivo evaluar la actividad antagónica *in vitro* de 12 aislamientos de *Trichoderma* spp. (7 nativos, 3 comerciales y 2 donados) contra un aislamiento de *Phytophthora palmivora*, el agente causal de la Pudrición del cogollo. Para determinar el potencial de estos aislamientos

en el control biológico, se evaluó la habilidad para competir con el patógeno, sus interacciones micoparasíticas y las propiedades antibióticas de sus metabolitos frente a *P. palmivora* *in vitro* y en folíolos inmaduros del cogollo. Los 7 aislamientos nativos se identificaron molecularmente mediante secuenciación parcial de la región ITS y TEF1. Como resultado, en las pruebas de micoparasitismo se observó enrollamiento, estrangulamiento de las hifas y colonización de los esporangios del patógeno. Además, la cepa CPTrZC-02 mostró la mayor frecuencia de interacciones con las hifas del patógeno (55 %) y los esporangios (63 %). Para la actividad de metabolitos volátiles, se encontró inhibición del crecimiento diametral de *P. palmivora*, con porcentajes entre 12,8 y 32,2 %. Para los metabolitos no volátiles, el desarrollo de *P. palmivora* fue limitado, con porcentajes de inhibición entre 81 y 98 % para los aislamientos CPTrZC-05, CPTrZC-02 y CPTrZC-04. El extracto crudo de CPTrZC-09 inhibió el desarrollo de lesiones del patógeno en un porcentaje del 100 %. Los aislamientos nativos se identificaron como *Trichoderma reesei* (CPTrZC-04), *Trichoderma harzianum* (CPTrZC-09), *Trichoderma asperellum* (CPTrZC-05 y CPTrZC-12) y *Trichoderma asperelloides* (CPTrZC-01, CPTrZC-10 y CPTrZC-11). Los aislamientos *T. reesei*, *T. harzianum* y *T. asperelloides*, debido a sus propiedades, son promisorios para las evaluaciones futuras de campo como parte de un plan de manejo integral de la Pudrición del cogollo en Colombia.

Lo que debe saber del Fondo de Fomento Palmero

Por: Gabriel Alejandro Molano, Especialista de Publicaciones y Ana Marcela Hernández, Analista de Publicaciones.

Gracias al Fondo de Fomento Palmero (FFP) los palmicultores cuentan desde hace 29 años con instrumentos para el desarrollo tecnológico; la investigación sobre el mejoramiento genético y problemas agronómicos; apoyar el estudio orientado a aumentar y mejorar el uso del aceite de palma; promocionar los atributos nutricionales; divulgar y promover los resultados de la investigación; desarrollar la infraestructura de comercialización y mecanismos de estabilización de precios de exportación para el palmiste, el aceite de palma y sus subproductos; y para fortalecer otras actividades y programas de interés general para la agroindustria de la palma de aceite.

Pero para entender aún más su función se tienen algunas preguntas y respuestas al respecto:

¿Qué es el Fondo de Fomento Palmero?

Es una cuenta especial para el recaudo y el manejo de los recursos provenientes de la Cuota de Fomento para la Agroindustria de la Palma de Aceite, creada mediante la Ley 138 de 1994, cuyo objeto es la financiación de programas y proyectos de beneficio para la agroindustria de la palma de aceite.



Investigación en problemas agronómicos del cultivo.
Foto: archivo Fedepalma.

¿Cuál es el destino de los dineros recaudados?

Los ingresos de la Cuota para el Fomento de la Agroindustria de la Palma de Aceite se aplican a la obtención de los siguientes 10 fines:

1. Apoyar los programas de investigación sobre el desarrollo y adaptación de tecnologías que contribuyan a mejorar la eficiencia de los cultivos de palma de aceite y su beneficio.
2. Investigar sobre el mejoramiento genético de los materiales de palma de aceite.
3. Investigar los principales problemas agronómicos que afectan el cultivo de la palma de aceite en Colombia.
4. Apoyar la investigación orientada a aumentar y mejorar el uso del aceite de palma, el palmiste y sus fracciones.
5. Investigar y promocionar los atributos nutricionales del aceite de palma, el palmiste y sus subproductos.
6. Apoyar programas de divulgación y promoción de los resultados de la investigación y de las aplicaciones y usos de los productos y subproductos del cultivo de la palma de aceite.
7. Apoyar a los cultivadores de palma de aceite en el desarrollo de la infraestructura de comercialización necesaria, de interés general para los productores, que contribuya a regular el mercado del producto, a mejorar su comercialización, reducir sus costos y a facilitar su acceso a los mercados de exportación.
8. Promover las exportaciones del palmiste, el aceite de palma y sus subproductos.
9. Apoyar mecanismos de estabilización de precios de exportación para el palmiste, el aceite de palma y sus subproductos, que cuenten

con el apoyo de los palmicultores y del Gobierno Nacional.

10. Apoyar otras actividades y programas de interés general para la agroindustria de la palma de aceite que contribuyan a su fortalecimiento.

¿Qué es la Cuota de Fomento Palmero?

De acuerdo con el Artículo 2 de la Ley 138 de 1994 es una contribución obligatoria de carácter parafiscal aplicada al sector palmero colombiano para ser utilizada en programas de interés general para el fortalecimiento de esta agroindustria.

¿Quién administra los recursos?

Según el Artículo 30 de la Ley 101 de 1993, “La administración de las contribuciones parafiscales agropecuarias y pesqueras se realizará directamente por las entidades gremiales que reúnan condiciones de representatividad nacional de una actividad agropecuaria o pesquera determinada y que hayan celebrado un contrato especial con el Gobierno Nacional, sujeto a los términos y procedimientos de la ley que haya creado las contribuciones respectivas”.

Además, según lo estipula el Artículo 9 de la Ley 138 de 1994, “Del organismo de gestión. El Gobierno Nacional, por intermedio del Ministerio de Agricultura, contratará con la Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite (Fedepalma) la administración del Fondo de Fomento Palmero y el recaudo de la Cuota para el Fomento de la Agroindustria de la Palma de Aceite”.

¿Quién integra el Comité Directivo?

Como lo establece el Artículo 10 de la Ley 138 y el Artículo 7 del Decreto 1730 de 1994, está integrado por seis miembros, así:

- El Ministro de Agricultura y Desarrollo Rural o su delegado, quien lo presidirá.
- El Ministro de Comercio, Industria y Turismo o su delegado.
- Cuatro representantes de los cultivadores de palma de aceite, uno por cada zona palmera del país.



Apoyo para mejorar la eficiencia del cultivo. Foto: archivo Fedepalma.

Funciones del Comité Directivo del Fondo

- Aprobar el presupuesto anual de ingresos y gastos del FFP presentado por Fedepalma, previo visto bueno del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural.
- Aprobar las inversiones que con recursos del FFP deba llevar a cabo Fedepalma y otras entidades de origen gremial al servicio de los palmicultores.
- Velar por la correcta y eficiente gestión del Fondo por parte de Fedepalma.

¿Cuál es la tarifa de la cuota?

Equivale al 1,5 % del precio de cada kilogramo de palmiste y aceite de palma crudo extraídos. El Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural fija para cada semestre el precio de referencia de liquidación de la cuota.

¿Quiénes son los sujetos de la cuota?

Todos aquellos que por cuenta propia se benefician del fruto de palma de aceite o quien encargue a una extractora o planta de beneficio la maquila de su fruto, según lo establecido en el Artículo 40 de la Ley 138 de 1994.

LA PALMA DE ACEITE, UNA AGROINDUSTRIA EFICIENTE, SOSTENIBLE Y MUNDIALMENTE COMPETITIVA

PALMAS

La revista Palmas volumen 44, número 1, fue editada por la
Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite, Fedepalma.

Esta publicación es propiedad de la Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite, Fedepalma, por tanto, ninguna parte del material ni su contenido, ni ninguna copia del mismo puede ser alterada en forma alguna, transmitida, copiada o distribuida a terceros sin el consentimiento expreso de la Federación. Al realizar la presente publicación, la Federación ha confiado en la información proveniente de fuentes públicas o fuentes debidamente publicadas. Contiene recomendaciones o sugerencias que profesionalmente resultan adecuadas e idóneas con base en el estado actual de la técnica, los estudios científicos, así como las investigaciones propias adelantadas. A menos que esté expresamente indicado, no se ha utilizado en esta publicación información sujeta a confidencialidad ni información privilegiada o aquella que pueda significar incumplimiento a la legislación sobre derechos de autor. La información contenida en esta publicación es de carácter estrictamente referencial y así debe ser tomada y está ajustada a las normas nacionales de competencia, Código de Ética y Buen Gobierno de la Federación, respetando en todo momento la libre participación de las empresas en el mercado, el bienestar de los consumidores y la eficiencia económica.