

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

PALMAS

Vol. 44 N°. 2

Volumen 44 N°. 2 de 2023 • pp. 1-130 • abril-junio de 2023 • ISSN digital 2744-8266.

CULTIVO

El catastro de la palma de aceite en Colombia

SOSTENIBILIDAD

Los aportes del aceite de palma a los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas: resultados de un análisis de los aspectos económicos

VALOR AGREGADO

Reutilización sostenible de residuos agroindustriales en ladrillos de cemento ecológico

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
web.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.
Álvaro Silva, Ph.D.
Fernando Munévar, Ph.D.

Coordinación Editorial

Ana Marcela Hernández Calderón

Especialista en Publicaciones digitales

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 Hablando sobre aceite de palma y sus derivados

About Palm Oil and its Byproducts

Nicolás Pérez Marulanda

CULTIVO

8 El catastro de la palma de aceite en Colombia

The Oil Palm Cadastre in Colombia

Rincón Romero, Víctor Orlando; Molina Villarreal, Angie; Zabala Quimbayo, Andrea; Barrera Agudelo, Osmar Ricardo; Torres León Jorge Luis

SOSTENIBILIDAD

25 Los aportes del aceite de palma a los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas: resultados de un análisis de los aspectos económicos

Palm Oil's Contribution to the United Nations Sustainable Development Goals: Outcomes of a Review of Socio-economic Aspects

Chiriaco, Maria Vincenza; Bellotta, Matteo; Jusi'c, Jasmina; Perugini, Lucia

59 Una década de aplicación de las herramientas de gestión del paisaje: evaluación del cambio de la cobertura del suelo utilizando imágenes basadas en UAS, un estudio de caso en una plantación de palma de aceite en Mapiripán, Meta, Colombia

A Decade of Landscape Management Tools Implementation: Land Cover Change Assessment Using UAS Based Imagery, a Case Study in an Oil Palm Plantation in Mapiripán, Meta, Colombia

Gómez Mateus, Adriana Marcela; Magiera, Anja; Domptail Stephanie; Espinosa, Juan Carlos; Gómez, Gustavo; Ruiz Delgado, Jonathan; Waldhardt, Rainer

■ VALOR AGREGADO

- 80 Reutilización sostenible de residuos agroindustriales en ladrillos de cemento ecológico
A Sustainable Reuse of Agro-Industrial Wastes into Green Cement Bricks
Chin, Wei Quan; Lee, Yeong Huei; Amran, Mugahed; Fediuk, Roman; Vatin, Nikolai; Kueh, Ahmad Beng Hong; Lee, Yee Yong

- 104 Mejora de la durabilidad de compuestos de hormigón sostenibles que comprenden residuos de película metalizada, fibras de envases de alimentos y cenizas de caldera de aceite de palma
Durability Enhancement of Sustainable Concrete Composites Comprising Waste Metalized Film Food Packaging Fibers and Palm Oil Fuel Ash
Alyousef, Rayed; Mohammadhosseini, Hossein; Ebid, Ahmed Abdel Khalek; Alabduljabbar, Hisham; Ngian, Shek Poi; Mohamed, Abdeliazim Mustafa

■ OTROS

- 126 Publicaciones en otros medios
Publications 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.

Hablando sobre aceite de palma y sus derivados

Las investigaciones nos ayudan a identificar retos y oportunidades y así definir qué camino debemos seguir en cuanto a cultivo, sanidad, procesamiento, sostenibilidad y valor agregado, entre otros.

En esta edición, en dos artículos se explica cómo la ceniza de caldera se puede usar en la fabricación de ladrillo de cemento ecológico y en la durabilidad del hormigón, respectivamente. Y en otro estudio se describe el proceso para conceptualizar el Catastro Palmero y cómo se desarrolló la estrategia de actualización continua.

En cuanto a la parte de sostenibilidad, se presenta una revisión de literatura sobre los aspectos socioeconómicos de la producción de aceite de palma que aportan al logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Además, se muestra un análisis del paisaje en una plantación de palma de aceite en Mapiripán, Meta, el cual concluye que, en el contexto colombiano, las plantaciones de palma de aceite podrían implementar herramientas de gestión del paisaje para evitar impactos adversos.

Es así como damos la bienvenida a una nueva edición de la revista Palmas.

NICOLÁS PÉREZ MARULANDA
Presidente Ejecutivo de Fedepalma

About Palm Oil and its Byproducts

Research helps us identify challenges and opportunities to define the road to take regarding crop management, sanitation, processing, sustainability and added value, among other matters.

In this issue, two papers explain how boiler ash may be used to manufacture ecologic cement bricks and its effects on the durability of concrete, respectively. Another paper describes the process to conceptualize the Oil Palm Cadaster and the development of the ongoing update strategy.

Regarding sustainability, this issue presents a literature review of the socioeconomic aspects of the production of palm oil that contribute to the Sustainable Development Goals (SDG). Furthermore, it analyzes the landscape of an oil palm plantation in Mapiripán, Meta, concluding that, in the Colombian context, oil palm plantations could implement landscape management tools to prevent adverse impacts.

Welcome to a new issue of Palmas magazine.

NICOLÁS PÉREZ MARULANDA
CEO of Fedepalma

El catastro de la palma de aceite en Colombia

The Oil Palm Cadastre in Colombia

CITACIÓN: Rincón-Romero, V. O., Molina-Villarreal, A., Zabala-Quimbayo, A. Barrera-Agudelo, O. R. & Torres-León, L. (2023). El catastro de la palma de aceite en Colombia (Traductor Rincón-Romero, V. O.). *Palmas*, 44(2), 8-24.

PALABRAS CLAVE: Administración catastral, Modelo de dominio de administración de tierras, Monocultivo, Cultivos oleaginosos.

KEYWORDS: Cadastral administration, Land administration domain model, Monoculture, Oil crops.

Traducido del original The Oil Palm Cadastre in Colombia. *Agronomía Colombiana*, 40(2), 258-269. Recuperado de <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v40n2.98801>

Derechos de autor: Agronomía Colombiana del Centro Editorial de la Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia está licenciada bajo una Licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Creado a partir de la obra en <http://revistas.unal.edu.co/index.php/agrocol/>.

RINCÓN-ROMERO, VÍCTOR ORLANDO
Corporación Centro de Investigación
en Palma de Aceite, Cenipalma
Autor para correspondencia
vrincon@cenipalma.org

MOLINA-VILLARREAL, ANGIE
Corporación Centro de Investigación
en Palma de Aceite, Cenipalma

ZABALA-QUIMBAYO, ANDREA
Corporación Centro de Investigación
en Palma de Aceite, Cenipalma

BARRERA-AGUDELO, OSMAR RICARDO
Corporación Centro de Investigación
en Palma de Aceite, Cenipalma

TORRES-LEÓN JORGE LUIS
Corporación Centro de Investigación
en Palma de Aceite, Cenipalma

Resumen

El artículo expone el proceso de construcción del modelo para la gestión de información geográfica relacionada con el cultivo de palma de aceite en Colombia, ya que debido a la necesidad de capturar, almacenar, actualizar y analizar datos de las áreas sembradas en el país, fue necesario soportarse en el modelo de Sistemas Blandos para plantear una estructura de sistema de información que respondiera no solo a las necesidades de inventario de áreas sembradas, sino

a la integración de dicha información con otros datos estratégicos para el sector palmicultor. Esta investigación permitió construir un modelo de base de datos sobre el cual, durante más de diez años, se ha almacenado de manera continua información geográfica relacionada con el área sembrada en palma de aceite en el país. El modelo geográfico ha permitido generar nueva información a diferentes escalas territoriales y la integración con datos de índole fitosanitaria, de gran importancia para el manejo regional de los cultivos. Adicionalmente, la integración de una plataforma tecnológica *web* ha logrado posicionar el Catastro Palmero como servicio de consulta para usuarios de diversos roles dentro del gremio palmicultor y como información geográfica base, de confianza, para soportar otros proyectos de la agroindustria palmera.

Abstract

This paper describes the process of developing the geographic information management model for the cultivation of oil palm in Colombia. Due to the need to collect, store, update and analyze data from planted areas in the country, it was necessary to rely on the soft systems model to propose an information system structure that would respond to the needs of accounting for planted areas and integrate such information with other strategic data for the oil palm sector. This research developed a database model on which the geographic data related to the area planted with oil palm in Colombia has been stored for over ten years. The geographic model has allowed creating new information at various territorial scales and integrating with phytosanitary data, which is important for regional crop management. Furthermore, the integration of a web-based platform has positioned the Oil Palm Cadastre as a consultation service for users working in various roles within the oil palm industry, and as a reliable geographical information bank to inform other oil palm projects agribusiness.

Introducción

El cultivo de palma de aceite en Colombia ha logrado una presencia significativa, representando aproximadamente 10 % del área total sembrada del país y 30 % de los cultivos agroindustriales (DANE, 2016; Fedepalma, 2019). Esta representatividad exige la elaboración y actualización permanente de un inventario de dichas áreas sembradas, ya que esta información es la piedra angular para una adecuada planificación y ordenamiento de los territorios.

Desde sus inicios, la Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite (Fedepalma) ha trabajado para consolidar y desarrollar una base de datos que brinde información sobre aspectos relevantes para la agroindustria, incluyendo la delimitación de área y representación espacial de zonas sembradas para asistir al sector palmicultor en la adecuada toma de decisiones. Por esto, como una primera aproximación para lograr dichos objetivos, Fedepalma, a través del Sistema de Información Estadística del Sector

Palmero (Sispa), ha recopilado periódicamente datos de venta de semillas a nivel nacional como una alternativa para estimar la superficie sembrada. Este método conduce a ciertas imprecisiones en el cálculo del área y requiere una serie de correcciones, principalmente relacionadas con las semillas descartadas para determinar área efectivamente sembrada.

Consciente de esta condición, en 2007 Fedepalma, en convenio con la Corporación Colombia Internacional (CCI), completó el primer trabajo de georreferenciación de la superficie sembrada con palma de aceite en el país, creando polígonos para alrededor de 276.000 ha de las 301.000 ha estimadas. Adicionalmente, en 2009 la Corporación Centro de Investigación en Palma de Aceite (Cenipalma), como parte de un proyecto financiado por el Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), realizó el primer ajuste a la base cartográfica desarrollada por el CCI, georreferenciando área adicional del cultivo, que sumó un total de 310.000 ha en comparación con las 350.000 ha estimadas para ese año.

Simultáneamente, Cenipalma, como parte de varios proyectos regionales de gestión de información fitosanitaria, desarrolló bases de datos geográficas que utilizaron polígonos para representar las áreas sembradas en los Llanos Orientales colombianos, Magdalena Medio (Zona Central) y San Andrés de Tumaco (Zona Suroccidental). En 2012, en esta primera etapa de recolección, se requirió enfocar los esfuerzos en la planificación y diseño de un Sistema de Gestión de Información que asegurara el almacenamiento, administración y consulta de datos de los lotes, en otras palabras, un catastro específico de las áreas con palma de aceite, comprendiendo que el catastro por definición corresponde al inventario de tierras (Kaufmann y Steudler, 1998) y que, bajo las directrices del catastro multipropósito, el inventario al que hace relación debe trascender la delimitación de las propiedades y debe ser soportado por subsistemas que conlleven al inventario de otros usos de la tierra (Ponvert Delisles *et al.*, 2015; Williamson *et al.*, 2014).

En esta conceptualización del Catastro Palmero (CP), su piedra angular fue el “paradigma de gestión de tierras” (Williamson *et al.*, 2014) en el que la información territorial de alta calidad es un componente esencial, utilizando el catastro de la propiedad como marco metodológico.

Según Ponvert Delisles *et al.* (2015), la mayoría de los sistemas de información catastral nacional almacenan datos generales que muchas veces no logran satisfacer las necesidades particulares de cada usuario. Por eso, es conveniente proponer y crear subsistemas específicos que permitan manejar la información a gran escala, dando lugar a la creación de subsistemas de catastro principalmente en las zonas rurales (que por tradición en los países se ha caracterizado por tener menos información). En la última década, esta necesidad se ha materializado en lo que se ha denominado el Catastro Verde o *Green Cadastre* (Zysk *et al.*, 2020). Algunos ejemplos incluyen el sistema de información parcelaria para el registro de cultivos y gestión de subsidios agrícolas en la Comunidad Europea (Inan *et al.*, 2010), el registro especializado de caña de azúcar en Cuba (Rojas-Martínez *et al.*, 2014; Kelly y Reyes, 2007), el catastro forestal en Grecia (Drosos, 2014), el catastro de viñedos en Rumania (Hutanu *et al.*, 2016; Hutanu y Moca, 2010), y el inventario de áreas de té en Turquía (Ozcelik y Nisanci, 2016), entre otros.

A partir de estas iniciativas y, teniendo en cuenta que el catastro predial históricamente se ha enfocado en determinar la valoración de las propiedades para efectos fiscales y/o crear un registro para la legitimación de los propietarios (Hopfer, 2003; Molina, 2000), se sugirió que la diferencia entre estos subsistemas y el catastro predial radica en el hecho de que la delimitación de los polígonos marca específicamente la unidad mínima constitutiva del subsistema catastral (Ozcelik y Nisanci, 2016, p. 47; Kelly y Reyes, 2007, p. 41) y no se realiza considerando los linderos del predio (Figura 1). Por lo tanto, los subsistemas catastrales son un complemento de catastro predial, con la representación espacial como componente integrador (Ponvert Delisles *et al.*, 2015).

Por lo tanto, es importante crear un sistema para almacenar el inventario georreferenciado de áreas sembradas con palma de aceite a escala de lote en Colombia. Su propósito principal es apoyar el proceso de toma de decisiones en esta industria y brindar información actualizada sobre las áreas cultivadas.

Este fue desarrollado como una herramienta tecnológica bajo los lineamientos de un sistema de información catastral (Çağdaş y Stubkjær, 2011), por lo tanto, este trabajo describe el proceso de conceptualización del CP y el desarrollo de la estrategia de actualización continua que finalmente da origen a una herramienta propuesta como referencia para la consulta de la información de las áreas plantadas con palma de aceite en Colombia.

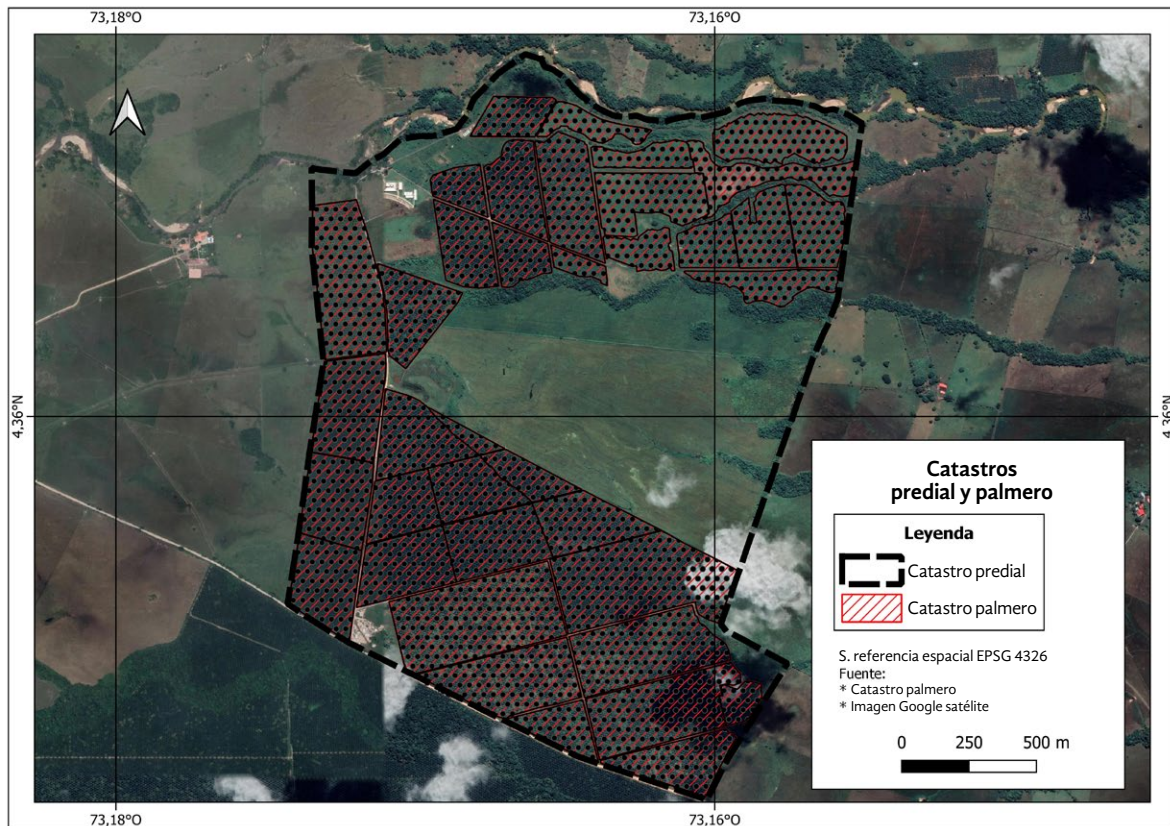
Materiales y métodos

El proyecto se desarrolló en dos etapas. Primero, se conceptualizó el sistema bajo el enfoque de la teoría de Sistemas Blandos (Çağdaş y Stubkjær, 2011) para definir los elementos y actores del CP. Por otro lado, se llevó a cabo la definición de los aspectos técnicos que permitieron implementar el CP a partir del marco conceptual del sistema.

Conceptualización del sistema

El sistema CP se basó en la incertidumbre sobre las áreas reales sembradas, sus características y distribución geográfica, por lo tanto, para dilucidar esta incógnita se creó un marco teórico a través de la práctica (Roux y Barry, 2009).

Figura 1 . Diferencia entre unidades mínimas del catastro predial y el subsistema Catastro Palmero



Fue así como el CP se concibió como un sistema y, como tal, se definieron las siguientes características (Wastell, 2012, p. 2):

- **Propósito:** brindar información georreferenciada sobre áreas sembradas con palma de aceite y asociar información orientada a la toma de decisiones relacionadas con el sector palmicultor.
- **Transformación:** recopilación de datos geográficos de las áreas sembradas con palma de aceite y datos relacionados con las características y el manejo del cultivo con el fin de crear productos de información para procesos de investigación, extensión y toma de decisiones.
- **Ciclos de retroalimentación:** su propósito es identificar toda el área sembrada del país, por lo tanto, puede tomar medidas para asegurar el cumplimiento de su objeto.

Sin embargo, este es entendido como un sistema blando bajo la teoría de sistemas, considerando que

su finalidad como sistema de almacenamiento de registros trasciende a la inclusión de la complejidad de los procesos de toma de decisiones humanos en todos sus componentes (Çağdaş y Stubkjær, 2011).

Desde sus inicios, el CP fue concebido como una herramienta cuyos principales actores son Fedepalma, Cenipalma y los palmicultores, interrelacionados a través de la recolección, almacenamiento y consulta de datos sobre las superficies sembradas con palma de aceite y los productos de información generados por el sistema.

Una primera actividad realizada fue la definición de los componentes constitutivos del CP para desglosar cada uno de los elementos que participan en la definición de áreas con palma de aceite. Esta definición consideró una jerarquía determinada por unidades espaciales asociadas principalmente a las funcionalidades e intereses de los actores. A cada unidad se le asignaron características y a su vez relaciones topológicas.

Direccionando la concepción del sistema hacia el componente operativo, se concibieron los aspectos en los que el CP se transforma de un inventario de áreas a datos funcionales que pueden ser integrados con diferentes fuentes para consolidar las características multipropósito del inventario.

Aspectos técnicos

Las fuentes de datos geográficos se clasificaron en tres categorías: producto de fotointerpretación, levantamiento directo con dispositivo de posicionamiento satelital (GPS) o información de terceros disponible en las plantaciones, por lo tanto, se tuvo que definir un esquema de procesamiento de datos (Figura 2) para monitorear la operación técnica de la base de datos geográfica. Estos aspectos de estructuración de datos fueron diseñados considerando un proceso detallado de revisión, corrección y ajuste de la información geográfica, con base en la Norma Técnica Colombiana NTC 5043 (ICONTEC, 2010):

• Totalidad

Se utilizó como fuente el listado de lotes por plantación proporcionado al inicio del proyecto, entendiendo que el total de polígonos debe ser igual al número de lotes reportados para la plantación.

• Coherencia lógica

Se evaluaron los siguientes elementos:

- *Consistencia de dominio* para el nombre, área, palmas y atributos del material.

- *Coherencia topológica* que evalúa el cumplimiento de las reglas topológicas, como superposición, geometrías no válidas, espacios y geometrías que no se repiten.

• Precisión de posición

Se revisaron los datos proporcionados por las plantaciones y se validó la ubicación real de los polígonos a través de imágenes satelitales.

Figura 2. Esquema de tratamiento de datos



Resultados y discusión

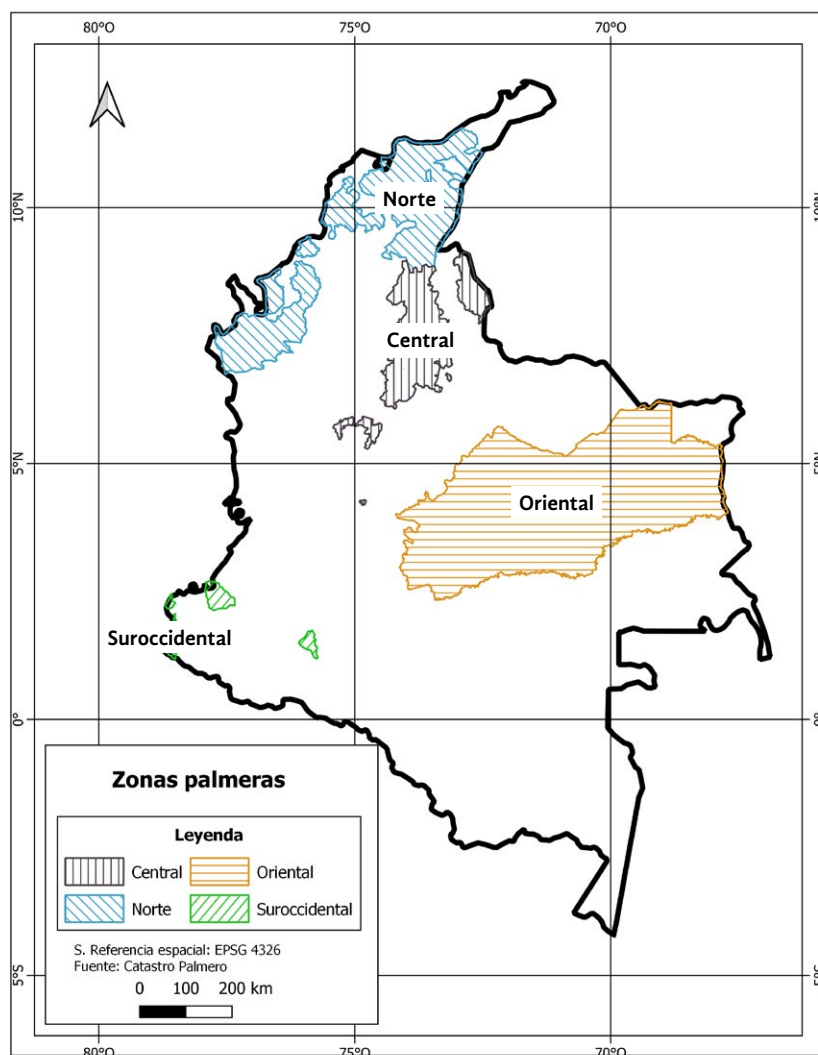
Catastro Palmero

El cultivo de palma de aceite en Colombia se distribuye en más de 120 municipios. Se delimita geográficamente a partir de lo que en el sector palmero se conoce como “zonas palmeras”, y desde una perspectiva administrativa y logística son llamadas: Norte, Central, Oriental y Suroccidental (Fedepalma, 2019) (Figura 3). Estas fueron establecidas con relación a las áreas circundantes que forman parte de una misma región geográfica. Asimismo, por razones operativas y de accesibilidad, dentro de cada zona se estableció un grupo de subzonas, definidas principalmente en función de condiciones agroecológicas o espaciales que las relacionan. Los límites de las subzonas pueden o no coincidir con los límites de los municipios.

Estas subzonas contienen plantaciones en varias propiedades rurales utilizadas principalmente para el cultivo de palma de aceite y son de propiedad legal de una o varias personas o compañías.

Según su tamaño, estas plantaciones abarcan una o varias parcelas (siendo el lote la mínima división espacial y administrativa dentro de una plantación), que suelen definirse en función de características homogéneas de sus elementos constituyentes (cultivar, fecha de siembra, tipo de suelo, etc.), accidentes geográficos u obras de infraestructura desarrolladas dentro de la plantación. Por lo tanto, es importante recalcar que una plantación de palma de aceite es un conjunto de lotes, que a su vez tienen diversos elementos geográficos y características inherentes a ellas (palmas, caminos, canales, tipo de cobertura, etc.); sin embargo, nótese que según Sagris y Devos (2008) no existe una relación absoluta entre la pro-

Figura 3. Distribución de las zonas palmeras en Colombia



piedad y la plantación, pues esta última puede conformar la totalidad de la propiedad, una fracción de ella o la suma de varias propiedades.

A continuación, se presentan las definiciones de los elementos que componen el CP.

- **Lote:** unidad espacial mínima plantada con palma de aceite dentro de una plantación, que por lo general tiene características similares en cuanto al año de siembra y cultivar.
- **Plantación:** conjunto de lotes, no necesariamente colindantes, agrupados bajo la propiedad y administración de una o varias personas (físicas o jurídicas).
- **Subzona:** división geográfica de las zonas de palma que permite monitorear adecuadamente las actividades logísticas y de extensión. Los límites de una subzona pueden o no coincidir con los de los municipios.
- **Zona:** división geográfica creada por Fedepalma para administrar adecuadamente las áreas productoras de palma en Colombia. Abarca uno o más municipios en uno o más departamentos.

Aspecto del Catastro Palmero

El catastro predial generalmente se refiere a dos aspectos: físico y legal (Çağdaş y Stubkjær, 2011). En el caso del CP, el aspecto físico se refiere a identificar y representar elementos geográficos (lotes, plantaciones, subzonas y zonas) mientras que el aspecto

agronómico se refiere explícitamente a características como la especificación de cultivar, especie, edad o estado fitosanitario, que se utilizan para describir las particularidades del cultivo que se encuentran en la unidad cartográfica más pequeña (lote).

Relaciones topológicas

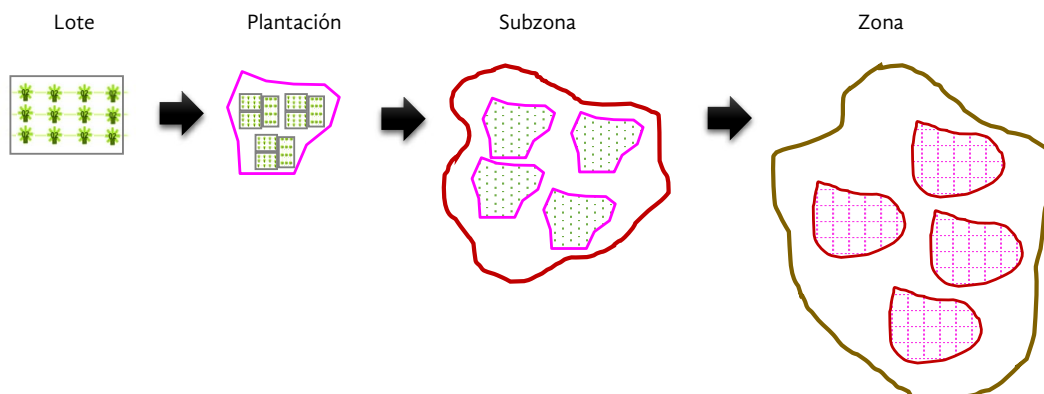
Considerando que los elementos fundamentales del CP tienen una representación geográfica, se tuvieron que definir las relaciones topológicas que establecen las conexiones jerárquicas entre ellos, es decir, la zona (el elemento de mayor jerarquía) está formada por varias subzonas, que a su vez están formadas por un determinado número de plantaciones de palma de aceite, que abarcan uno o varios lotes. La Figura 4 es una representación gráfica de la distribución jerárquica de los elementos del CP.

Además, definir la relación de los elementos del CP con el catastro predial, permitió integrar nuevos actores al sistema como las entidades territoriales y las instituciones relacionadas con el ordenamiento de los territorios. Se consideraron los productos de información generados por el CP como insumos que, integrados a la propiedad, son fundamentales para planificar y proponer estrategias y políticas en los territorios.

Estructura multipropósito

En una primera instancia, el CP fue concebido como una solución para cuantificar el área total

Figura 4. Distribución jerárquica de elementos del CP



sembrada en Colombia. Sin embargo, contar con la conceptualización y representación geográfica de los objetos espaciales, permitió integrar otro tipo de información estratégica, por lo que el CP actualmente se concibe bajo un enfoque multipropósito que facilita la integración de la información agronómica derivada de las actividades del cultivo para potenciar los criterios de toma de decisiones.

Fue así como se redefinieron los elementos del CP, considerando la posibilidad de representar variables fitosanitarias, productivas y el manejo agronómico de los cultivos a escala regional.

Definición de los límites de la parcela

En el campo del catastro predial, principalmente en áreas urbanas, tener una precisión al centímetro es fundamental. En Colombia la cartografía rural se ha desarrollado a una escala máxima de 1:10.000, reduciendo sustancialmente los requisitos de precisión. Sin embargo, la definición material de los límites de propiedad en espacios rurales y urbanos es indicativa y precisa, por ejemplo, los cercos en propiedades rurales. En el caso de los lotes de palma, son generalmente conocidos por no tener una delimitación física explícita. Por lo tanto, la conceptualización incluyó una definición de los límites del lote, entendidos como la proyección al suelo del dosel de las palmas plantadas en el borde del lote.

En la práctica, según la definición anterior, el límite cambiaría a medida que crece la palma; por lo que se complementó el concepto anterior con la proyección al suelo del dosel de las palmas adultas, lo que en términos prácticos es extrapolable a la mitad de la distancia de plantación entre palmas.

Después de definir el concepto de límite de lote, fue necesario especificar la precisión mínima para medirlo; por lo que se decidió que el error máximo tolerable para definir el perímetro de un lote sería de 10 metros, aceptando así la variación encontrada en la definición del límite con base en la proyección del dosel, lo que permitió incluir herramientas como dispositivos GPS de baja precisión e imágenes satelitales con una resolución de 5 metros, optimizando los trabajos de medición del área sin afectar la calidad de los datos. Como resultado, y considerando las pautas

establecidas por Tobler (Tobler, 1987), se determinó una escala de 1:20.000 para el CP.

Teniendo en cuenta que el desarrollo del CP tiene como objetivo brindar una cuantificación aproximada del área sembrada del país y la coordinación del enfoque multipropósito, se definieron dos componentes fundamentales que establecen los objetivos y alcances del sistema. El primero, la aproximación al aspecto físico (cuantificación y representación geográfica) y, el segundo, el aspecto agronómico (caracterización del cultivo).

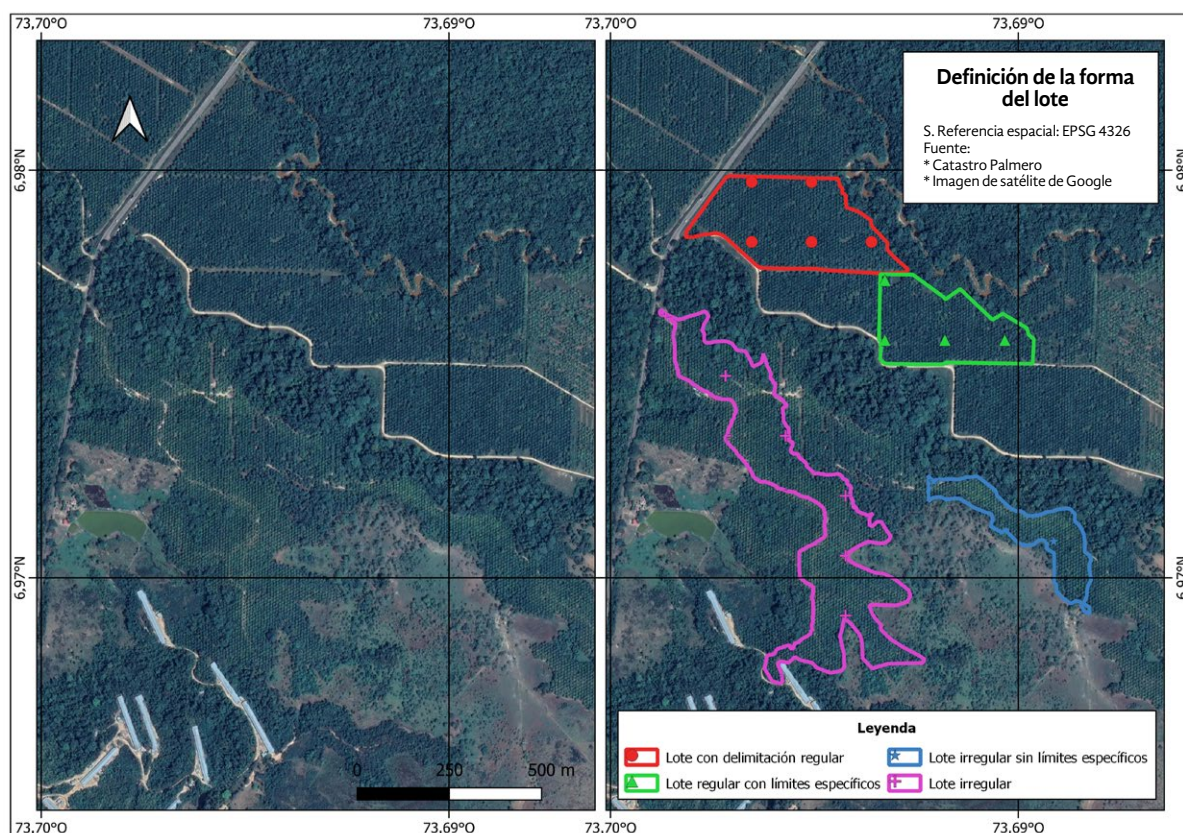
Aspecto físico

En una primera aproximación, las áreas correspondientes a palma de aceite se identifican mediante fotointerpretación de imágenes satelitales sin llegar a una delimitación definitiva de los lotes y plantaciones (Johansen *et al.*, 2009; Kelly *et al.*, 1999; Rodríguez Pérez *et al.*, 1999). Los sensores utilizados fueron *Sentinel 2* y *Landsat 8*, teniendo en cuenta que sus datos son de acceso libre y la multitemporalidad y características para la discriminación de cultivos (Jayanth *et al.*, 2022; Sarvia *et al.*, 2020). Una alternativa futura podría involucrar la delimitación de lotes por medio de técnicas de procesamiento de imágenes, como el uso de redes neurales (KC *et al.*, 2021; Taravat *et al.*, 2021); no obstante, estas técnicas aún se encuentran en fase de investigación y considerando que la precisión temática de la delimitación de las áreas cultivadas debe ser de alta calidad, se mantiene la fotointerpretación humana como primer recurso en la restitución del aspecto físico.

Se establecieron las siguientes propiedades del lote para definir las reglas de fotointerpretación (Stone, 1955): forma, tamaño, estructura, textura y color.

- **Forma:** los lotes sembrados con palma se caracterizan generalmente por tener formas regulares; sin embargo, también existen formas irregulares o formas definidas por consideraciones administrativas y no están relacionadas con los límites geográficos (Figura 5).
- **Tamaño:** generalmente, un área con palma puede variar entre 1 y 20 hectáreas sin ninguna discontinuidad identificable como caminos o cuerpos de agua. Sin embargo, puede haber casos inusuales donde hay plantaciones con una superficie mayor.

Figura 5. Definición de la forma de lotes en cultivos de palma de aceite



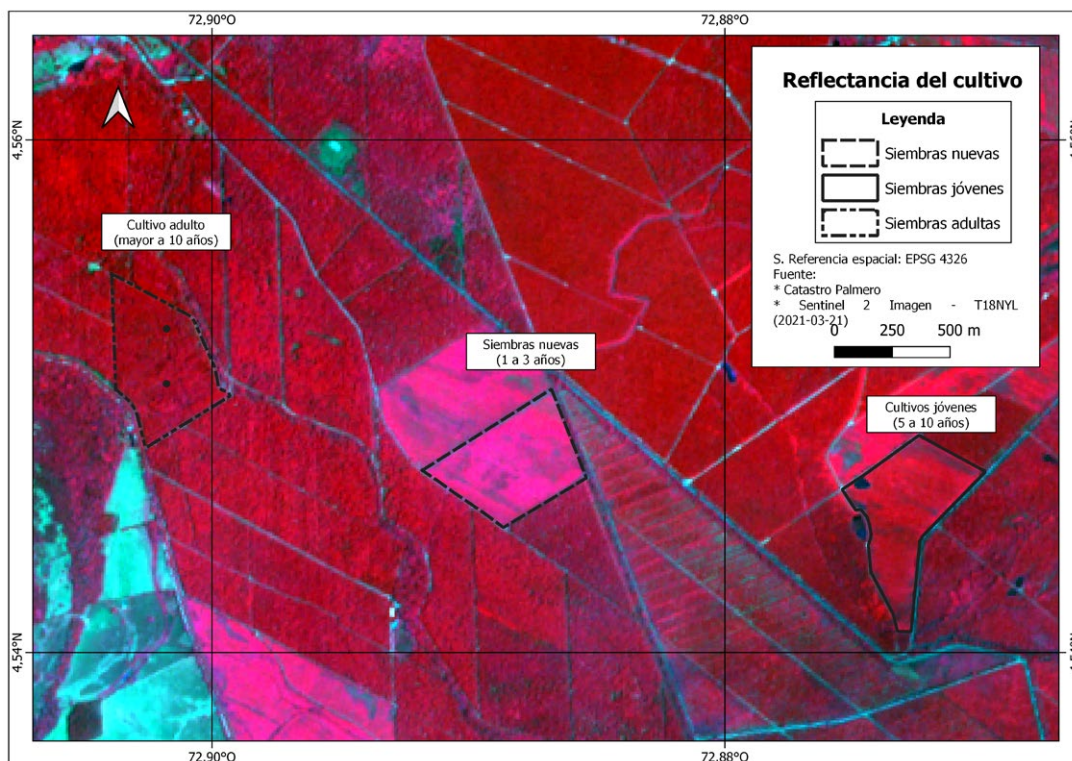
- **Estructura:** la estructura al interior de un lote de palma debe considerar la presencia de formaciones escalonadas o patrones de siembra que forman triángulos equiláteros entre palmas. Sin embargo, puede haber casos en los que no cumplan con esta regla, como las plantaciones en terrazas. La identificación de infraestructura de canales de riego dentro del cultivo puede ser un indicador de plantaciones nuevas o jóvenes.
- **Textura y color:** en este caso, se abordan dos propiedades estrechamente relacionadas, ya que ambas están sujetas principalmente a la variación en la edad de siembra. En imágenes espaciales de alta resolución es posible distinguir la formación escalonada. Sin embargo, las imágenes con una resolución espacial igual o superior a cinco metros requirieron definir una serie de claves que facilitarían la identificación de los cultivos (Figura 6). Aunque hay que tener en cuenta que la similitud entre la reflectancia de los cultivos de palma de

aceite con otros como el banano y los bosques implica una verificación de campo.

Para establecer un proceso ordenado de fotointerpretación, se creó una grilla de cuadrados de 5 x 5 km cubriendo todas las áreas de zonas palmeras. A cada grilla se le asignó información de rastreo para desarrollar el estado del proceso, quién, cuándo y con qué imagen lo hizo, esta serie de datos se utilizó para rastrear el proceso de actualización del área. En cada cuadrícula se estableció un proceso de revisión mediante desplazamiento lateral y vertical de forma manual, donde se restauran cada una de las áreas identificadas como palma de aceite.

A partir del proceso de actualización de las áreas sembradas con palma llevado a cabo con frecuencia semestral, se estableció un proceso adicional en la base de datos del CP correspondiente a la revisión de las grillas de control, lo que permitió llevar un registro de las revisiones realizadas en un mismo cua-

Figura 6. Interpretación de la edad de la palma en combinación con el infrarrojo de color falso en la imagen LandSat 8



drante a lo largo del tiempo e identificar áreas potenciales de actualización.

Aspecto agronómico

Este aspecto corresponde a la caracterización de la mínima unidad de administración de las plantaciones, comúnmente llamado lote.

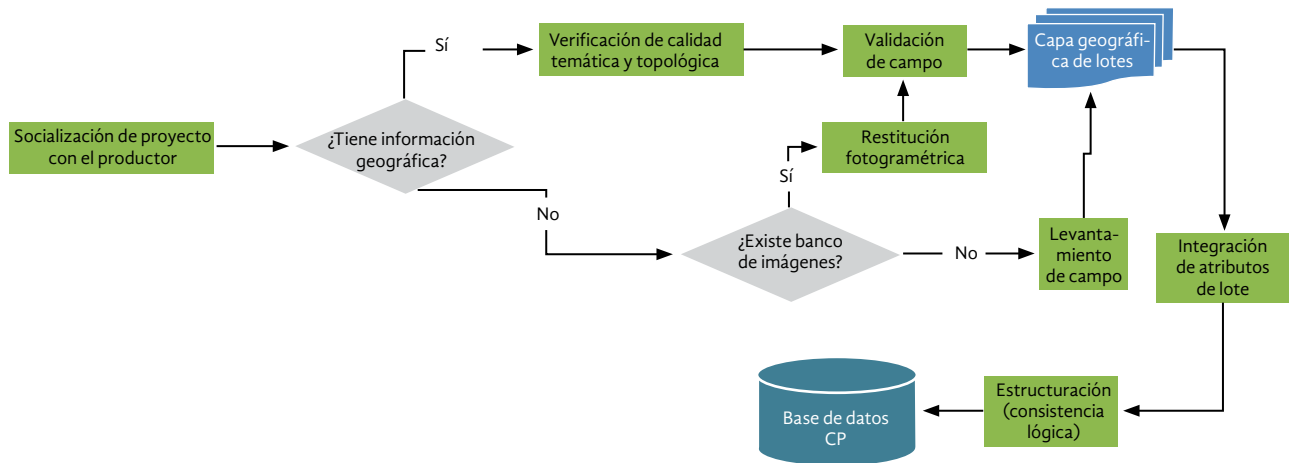
A falta de una norma para la definición de los límites de los lotes, siendo cada plantación autónoma para definirlos, fue necesario describir al lote como la unidad mínima de agrupación de palmas a la que se asocian los datos de producción, fitosanitarios, entre otros. En la mayoría de los casos, los lotes contienen palmas del mismo año de siembra, cultivar y tienen límites físicos. De esta forma, el aspecto agronómico define la geometría de los lotes de acuerdo con la administración de la plantación y complementa los datos de número de palmas, densidad de plantación, cultivar(es), año de plantación y área neta en hectáreas.

Este aspecto requería mayor esfuerzo y dedicación, ya que exigía establecer un contacto directo con los propietarios, gerentes o directores de la plantación a través de los Núcleos Palmeros (plantas de beneficio). Los lazos de confianza entre Núcleos y palmicultores permitieron acceder a las plantaciones y obtener datos veraces.

Cabe anotar que el enlace comercial entre los Núcleos y los palmicultores, las Unidades de Asistencia y Auditoría Técnica, Ambiental y Social (UAATAS), adoptado en 2008 (Fedepalma, 2009), potenció la estrategia de contacto con los cultivadores porque los Núcleos se mostraron receptivos a considerar la importancia de georreferenciar las áreas sembradas a escala de lote. A continuación, se presenta el esquema de procesos diseñado para la correcta gestión y recolección de la información catastral de las plantaciones (Figura 7).

El Catastro Nacional de Palma de Aceite se integra en dos etapas:

Figura 7. Esquema de gestión de datos



- Inclusión de datos geográficos (aspecto físico), con actualización semestral.
- Asociación de la información agronómica a cada lote (aspecto agronómico) en proceso permanente.

Con la inclusión de las consideraciones técnicas, se hizo evidente un nuevo actor en el sistema del CP que no había sido contemplado en la formulación inicial. De ahí que los Núcleos Palmeros aparezcan como un factor determinante en el proceso de formación y como consumidor de los productos informativos. Así, finalmente, la formalización de los procesos orientados a la gestión y procesamiento de los datos consolida finalmente el modelo del Sistema de Catastro Palmero (Figura 8).

Artefactos de tecnologías de la información

Se diseñó una base de datos espacial implementada en *Microsoft SQL Server Database Management System* para almacenar datos espaciales y alfanuméricos, con el propósito de eliminar redundancia, proveer capacidades para el procesamiento de datos, análisis, visualización e intercambio (Dawidowicz *et al.*, 2020). Se integró la base de datos espacial SQL Server a la plataforma *ArcServer* para desarrollar geoservicios orientados a la publicación de la información en el portal de internet <https://geopalma.cenipalma.org>

El geoservicio desarrollado consolida los valores de las áreas sembradas a escala de municipio, siendo un ejemplo de la interacción entre el CP y unidades territoriales como los municipios (Figura 9).

Avances en la consolidación de la información

Como se mencionó anteriormente, el trabajo de la Corporación Colombia Internacional (CCI) en 2007 se considera la base inicial del CP. A lo largo de 10 años se ha georreferenciado cerca de 100 % del área estimada sembrada con palma de aceite en el país. El aspecto físico ha tenido un proceso continuo de construcción (cada zona es revisada nuevamente cada 6 meses) en paralelo con la expansión del cultivo, iniciando con cerca de 276.000 ha georreferenciadas en 2007 a 625.066 ha en 2020. En cuanto al avance del aspecto agronómico, que por definición es más lento, pasó de 0 hectáreas en 2007 a 160.000 ha en 2017, con un aumento significativo durante los últimos 3 años, principalmente por la participación de Núcleos y palmicultores en el CP (Figura 10). Con corte a 2020, se estructuró un total de 635.066 ha en términos físicos, de las cuales 345.600 ha están completamente caracterizadas en el aspecto físico y agronómico.

El avance en los aspectos mencionados dependió de las condiciones de cada región, en subzonas como

Figura 8. Modelo de Sistema de Catastro Palmero

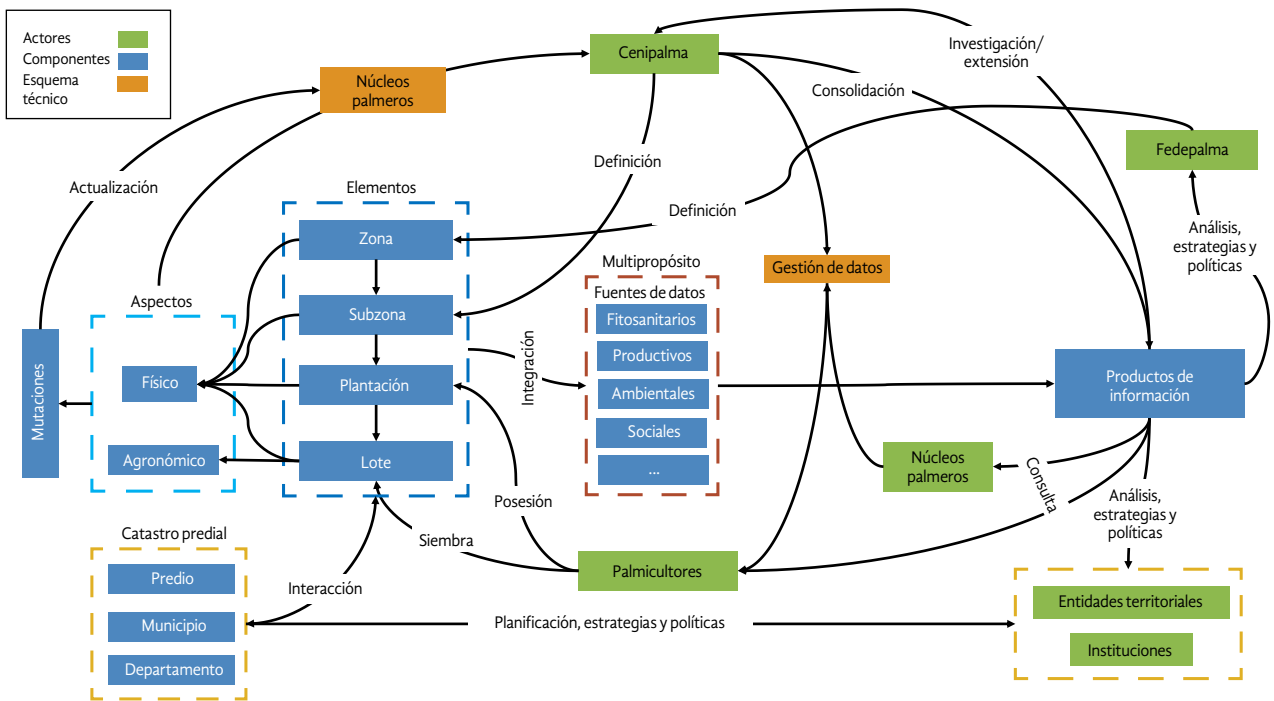


Figura 9. Geoservicio desarrollado para consulta de datos del Catastro Palmero

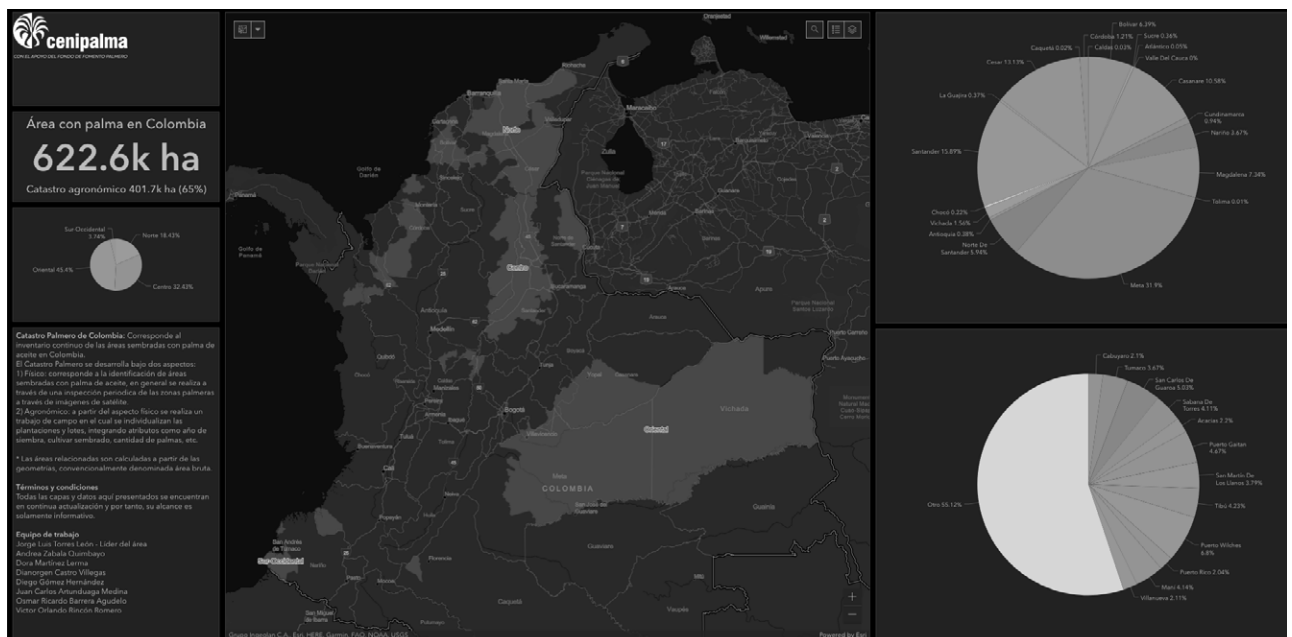
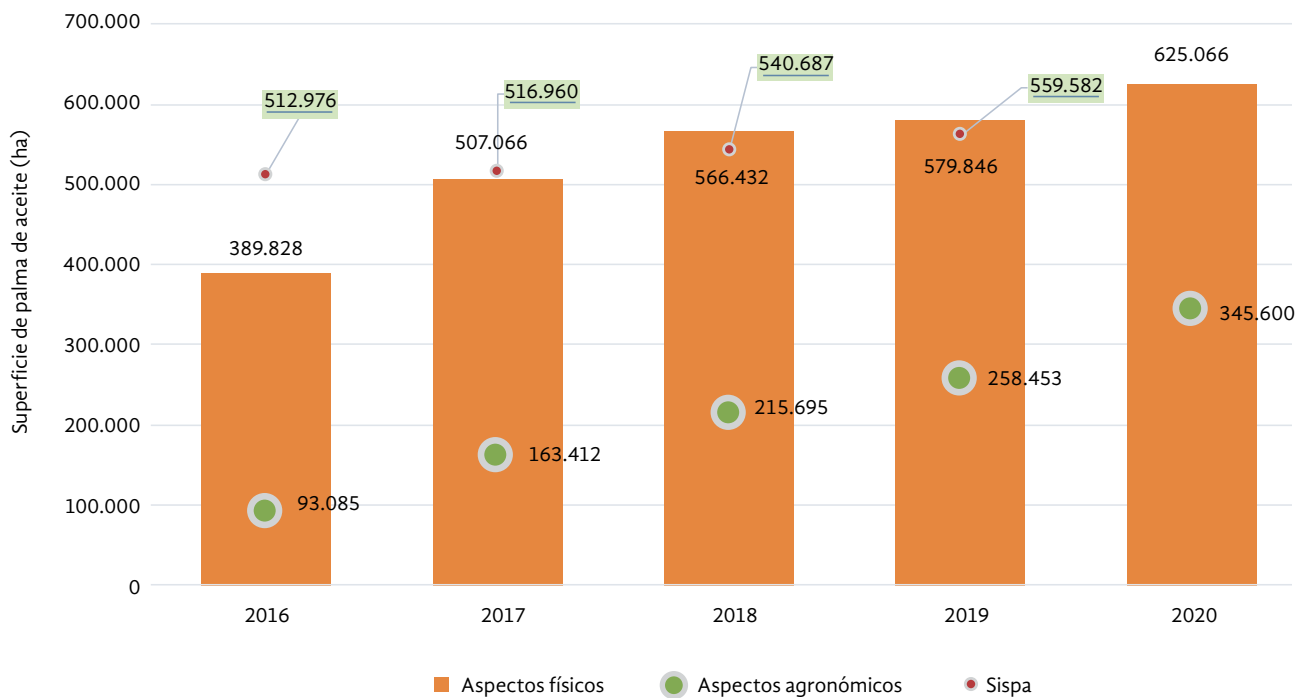


Figura 10. Evolución del Catastro Palmero



sur del Cesar, sur de Bolívar, Acacías o Fundación, en su mayoría han podido consolidar su aspecto agroeconómico gracias a la integración y participación de los Núcleos Palmeros de las subzonas.

El aspecto físico ha permitido identificar con precisión el área sembrada en cada una de las zonas de cultivo de palma de aceite (Figura 11), destacando que para 2020 la Zona Oriental concentra cerca de 46 % de la participación del país.

Uno de los resultados más interesantes ha sido la posibilidad de consolidar datos a escala de unidades territoriales, como los departamentos (Figura 12). A 2020, el departamento con mayor superficie sembrada del país fue Meta, seguido de Santander y Cesar, lo que reitera que las zonas palmeras Oriental y Central cuentan con las mayores superficies sembradas del país.

Conclusiones

Desde una perspectiva de Sistemas Blandos, el modelo del sistema del CP permitió incluir las complejas interacciones entre actores. Esto se tradujo en un

avance significativo en la consolidación de la información del sistema. La incorporación de los Núcleos Palmeros y los cultivadores como actores activos aceleró el proceso de recopilación de datos y garantizó una retroalimentación continua de los resultados del proyecto.

La conceptualización del CP se hizo “sobre la marcha”, lo que permitió realizar ajustes que se debieron principalmente a la incorporación de nuevos actores al proceso. Con esto, la teoría de los Sistemas Blandos se confirma como una alternativa para conceptualizar los sistemas y subsistemas catastrales.

La creación de un registro de las áreas sembradas soportado en una base georreferenciada es un esfuerzo que ha llevado muchos años y recursos, sin embargo, este esfuerzo se debe a la complejidad del cultivo y su entorno. De esta experiencia se destaca la integración del Sistema a los procesos preestablecidos del programa de extensión (UAATAS), sin los cuales, no hubiera sido posible consolidar el aspecto agronómico, y el Sistema se hubiera limitado al aspecto físico.

Figura 11. Distribución del área sembrada por zona

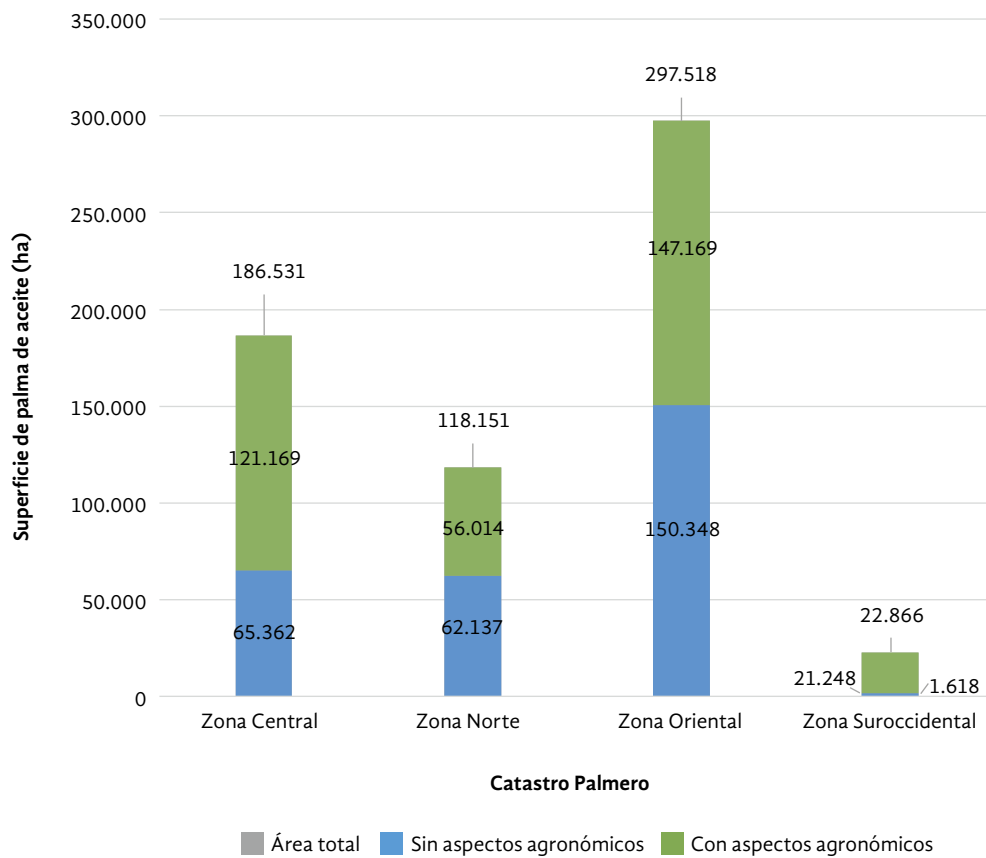
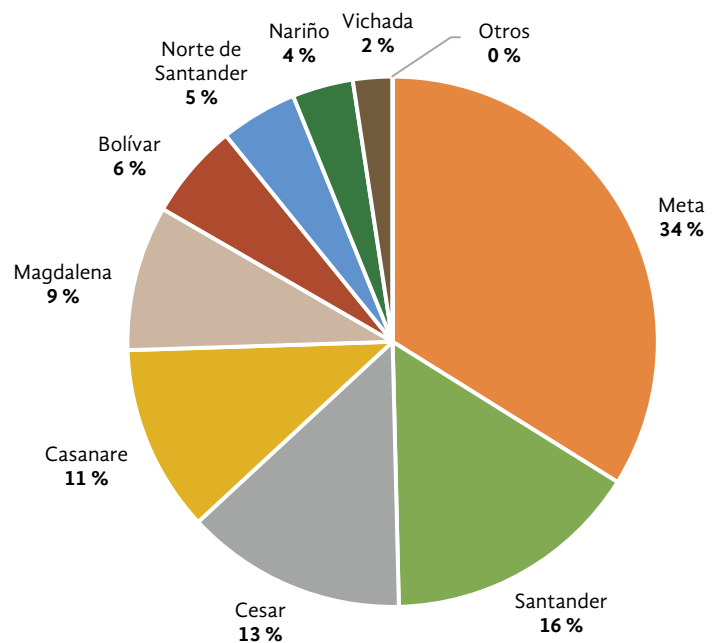


Figura 12.
Superficie sembrada por departamento



Tras varios años de trabajo, se considera que el CP ha alcanzado la madurez, fortaleciendo procesos que garanticen la calidad de los datos producidos, cada vez más cercanos a la representación del área total sembrada del país. Por lo tanto, los esfuerzos deben enfocarse en la fase de comunicación del Sistema, la cual, si bien tiene algunos avances, debe estar dirigida principalmente a que el uso de la información producida es para trascender los procesos del sector palmicultor, conectar con entidades y gobiernos, entendiendo que la agroindustria de la palma de aceite es parte esencial del desarrollo de las regiones donde existe.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Fondo de Fomento Palmero, administrado por Fedepalma, a Cenipalma, a los Núcleos Palmeros y a los palmicultores, por ser los actores principales del CP y la piedra angular de su desarrollo. También lo hacen de manera especial al profesor Rodrigo Castellanos (Q. E. P. D.), quien en sus lecciones impulsó el desarrollo del catastro más allá del registro de la propiedad. Finalmente, al equipo de trabajo del CP y a sus familias.

Bibliografía

- Çağdaş, V., & Stubkjær, E. (2011). Design Research for Cadastral Systems. *Computers, Environment and Urban Systems*, 35(1), 77-87. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2010.07.003>
- DANE. (2016). Encuesta Nacional Agropecuaria ENA-2016. En *Boletín técnico comunicación informativa (DANE)* (Issue 1). <http://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/agropecuario/encuesta-nacional-agropecuaria-ena>
- Dawidowicz, A., Kulawiak, M., Zysk, E., & Kocur-Bera, K. (2020). System Architecture of an INSPIRE-compliant Green Cadastre System for the EU Member State of Poland. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 20(August). <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100362>
- Drosos, V. C. (2014). CADASTRE (forest maps) and Spatial Land Uses Planning, Strategic Tool for Sustainable Development. *2nd International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment, RSCy2014*, 9229, 1-9. <https://doi.org/10.1117/12.2069662>
- Fedepalma. (2009). Unidades de Asistencia y Auditoría Técnica, Ambiental y Social (UAATAS): una estrategia para el manejo sanitario y para incrementar la productividad y competitividad palmera. *Revista Palmas*, 30, 5-6.
- Fedepalma. (2019). *Anuario Estadístico 2019* (Fedepalma (ed.)). La agroindustria de la palma de aceite en Colombia y en el mundo 2014-2018. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/anuario/issue/view/1452/>
- Hopfer, A. (2003). Cadastre as a Compact Tool for Proper Land Use-via Taxation and Physical Planning. *Best Practices in Land Administration-Regional Perspectives, FIG Workin*, Paris, France, April 13-17 2003.

- Hutanu, C., & Moca, V. (2010). Use of Cadastral Plan in Digital Form and the Databases Informations System for the National Vineyard Landsurvey. *Lucrari Stiintifice*, 53(2), 96.
- Hutanu, C., Radu, O., & Padure, D. (2016). Updating of Cadastral Database with a View to the Creation of Vineyards and Fruit Trees. *Lucrari Stiintifice*, 59(1), 289-294.
- ICONTEC. (2010). *NTC 5043. Conceptos básicos de la calidad de los datos geográficos*. ICONTEC.
- Inan, H. I., Sagris, V., Devos, W., Milenov, P., van Oosterom, P., & Zevenbergen, J. (2010). Data Model for the Collaboration Between Land Administration Systems and Agricultural Land Parcel Identification Systems. *Journal of Environmental Management*, 91(12), 2440-2454. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.06.030>
- Jayanth, J., Aravind, R., & Amulya, C. M. (2022). Classification of Crops and Crop Rotation Using Remote Sensing and GIS-Based Approach: A Case Study of Doddakawalande Hobli, Nanjangudu Taluk. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 50(2), 197-215. <https://doi.org/10.1007/s12524-020-01296-0>
- Johansen, K., Phinn, S., Witte, C., Philip, S., & Newton, L. (2009). Mapping Banana Plantations from Object-oriented Classification of SPOT-5 Imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 75(9), 1069-1081. <https://doi.org/10.14358/PERS.75.9.1069>
- Kaufmann, J., & Steudler, D. (1998). *Cadastrre 2014 a Vision for a Future Cadastral System* (Issue July). FIG.
- KC, K., Zhao, K., Romanko, M., & Khanal, S. (2021). Assessment of the Spatial and Temporal Patterns of Cover Crops Using Remote Sensing. *Remote Sensing*, 13(14). <https://doi.org/10.3390/rs13142689>
- Kelly, M., Estes, J. E., & Knight, K. A. (1999). Image Interpretation Keys for Validation of Global Land-cover Data sets. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 65(9), 1041-1050.
- Molina, M. A. (2000). *El Catastro y su evolución hasta el siglo XVI*. 51-64.
- Ozcelik, A. E., & Nisanci, R. (2016). Land Use Patterns for Driving Environmental Management of Tea Agricultural Croplands. *Computers and Electronics in Agriculture*, 122, 41-54. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.01.013>
- Ponvert Delisles, D. R., Samuel Kelly, F., & Reyes, I. (2015). Las técnicas geomáticas aplicadas en la agricultura: el catastro agrícola en Cuba. *Revista de Ciencias Espaciales*, 8, 11-28.
- Rodríguez Pérez, J. R., González, Vazquez, X. P., & Arias Sánchez, P. (1999). Cartografía de usos del suelo por fotointerpretación mediante sistemas de información geográfica (SIG) análisis comparativo de los sistemas ráster y vectorial. En Universidad Pública de Navarra (Ed.), *Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica (INGEGRAF)* (pp. 1513-1523). Actas del XI Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica: Logroño-Pamplona. 2, 3 y 4 junio. <http://buleria.unileon.es/handle/10612/3033>

- Rojas-Martínez, O., Rodríguez-Fajardo, A., Vázquez-Acuña, C., Pablos-Reyes, P., & Borrero-Reynaldo, Y. (2014). Implementación de un sistema de información geográfica para las decisiones en la producción cañera de Santiago de Cuba. *Ciencia en su PC*, 2, 42-55.
- Roux, L., & Barry, M. (2009). Paradigms and Cadastral Research. *Spatial Data Serving People: Land Governance and the Environment-Building the Capacity*. http://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/vietnam/ppt/ts02d/ts02d_roux_barry_ppt_3704.pdf
- Sagris, V., & Devos, W. (2008). *LPIS Core Conceptual Model: Methodology for Feature Catalogue and Application Schema* (European Communities (ed.)). <https://doi.org/10.2788/80091>
- Samuel Kelly, F., & Reyes, I. (2007). Catastro especializado en la agricultura cañera en Cuba: antecedentes, creación y relación con el Catastro Nacional. *V Congreso Internacional de Geomática*, 129, 39-42.
- Sarvia, F., De Petris, S., & Borgogno Mondino, E. (2020). Multi-Scale Remote Sensing to Support Insurance Policies in Agriculture: From Mid-Term to Instantaneous Deductions. *GIScience and Remote Sensing*, 57(6), 770-784. <https://doi.org/10.1080/15481603.2020.1798600>
- Stone, K. H. (1955). Air Photo Interpretation Procedures. En *Photogrametric Engineering* (pp. 123-132).
- Taravat, A., Wagner, M. P., Bonifacio, R., & Petit, D. (2021). Advanced Fully Convolutional Networks for Agricultural Field Boundary Detection. *Remote Sensing*, 13(4), 1-12. <https://doi.org/10.3390/rs13040722>
- Tobler, W. (1987). Measuring Spatial Resolution. *Land Resources Information Systems Conference, January 1987*, 12-16.
- Wastell, D. (2012). Systems Thinking: An Introductory Essay. *October, March*. http://www.managingbydesign.net/my_library/systems_thinking.pdf
- Williamson, I., Enemark, S., Wallace, J., & Rajabijard, A. (2014). *Administración de la tierra para un desarrollo sostenible*. customerservice@ingrampublisherservices.com
- Zysk, E., Dawidowicz, A., Nowak, M., Figurska, M., Żróbek, S., Żróbek, R., & Burandt, J. (2020). Organizational Aspects of the Concept of a Green Cadastre for Rural Areas. *Land Use Policy*, 91(February). <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104373>

Los aportes del aceite de palma a los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas: resultados de un análisis de los aspectos económicos*

Palm Oil's Contribution to the United Nations Sustainable Development Goals: Outcomes of a Review of Socio-economic Aspects

CITACIÓN: Chiriaco, M. V., Bellotta, M., Jusi'c. J. & Perugini Lucia. (2023). Los aportes del aceite de palma a los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas: resultados de un análisis de los aspectos económicos. *Palmas*, 44(2), 25-58.

PALABRAS CLAVE: Aceite de palma, Objetivos de Desarrollo Sostenible, ODS, Certificación de sostenibilidad, Fin de la pobreza, Hambre cero, Desarrollo económico.

KEYWORDS: Palm oil, Sustainable Development Goals, SDG, Sustainability certification, No poverty, Zero hunger, Economic growth.

*Traducido del original Palm Oil's Contribution to the United Nations Sustainable Development Goals: Outcomes of a Review of Socio-economic Aspects. Maria Vincenza Chiriaco *et al.* 2022 *Environ. Res. Letón*. 17 063007. 10.1088/1748-9326/ac6e77

Derechos de autor: El contenido original de este trabajo puede usarse bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution 4.0. Cualquier distribución posterior de este trabajo debe mantener la atribución al autor(es) y el título del trabajo, la cita de la revista y el doi.

CHIRIACO, MARIA VINCENZA

Fondazione Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (CMCC), División Impactos en la Agricultura, Bosques y Servicios Ecosistémicos (IAFES por sus siglas en inglés), Viterbo, 01100, Italia.

Autor para correspondencia:

E-mail: mariavincenza.chiriaco@cmcc.it

BELLOTTA, MATTEO

Fondazione Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (CMCC), División Impactos en la Agricultura, Bosques y Servicios Ecosistémicos (IAFES por sus siglas en inglés), Viterbo, 01100, Italia.

JUSI'C, JASMINA

Fondazione Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (CMCC), División Impactos en la Agricultura, Bosques y Servicios Ecosistémicos (IAFES por sus siglas en inglés), Viterbo, 01100, Italia.

PERUGINI, LUCIA

Fondazione Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (CMCC), División Impactos en la Agricultura, Bosques y Servicios Ecosistémicos (IAFES por sus siglas en inglés), Viterbo, 01100, Italia.

Resumen

El aceite de palma es el aceite vegetal más utilizado del mundo y el más criticado por su impacto ambiental debido a la advertida reducción en las áreas de bosque tropical para su cultivo en las últimas décadas. Sin embargo, hay muy poca discusión sobre las implicaciones socioeconómicas asociadas con su producción. Para contribuir a un debate más informado, se realizó una

revisión en profundidad de la literatura existente que aborda los diversos aspectos socioeconómicos de la producción de aceite de palma, describiendo sus aportes al logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas. Los resultados, hallazgos y conclusiones de 82 estudios publicados a partir de 2010 fueron clasificados como positivos, negativos, neutros o variados y, en ocasiones, incluso contradictorios, con respecto a los aportes del cultivo de palma y/o la producción de aceite de palma al logro de un conjunto de ocho ODS seleccionados por ser los más relacionados con el desarrollo socioeconómico, diferenciando entre producción sostenible y convencional, cuando fuera posible. Los resultados muestran que es difícil trazar puntos de vista uniformes, destacando los matices y las variadas facetas de los aportes del aceite de palma a los ocho ODS, algunos de los cuales están inevitablemente interconectados. En general, se desprende que el aceite de palma desempeña un papel crucial en el impulso de la economía y los medios de vida de las comunidades locales en muchos de los países en vía de desarrollo que lo producen, contribuyendo sustancialmente a la reducción de la pobreza y a la seguridad alimentaria. Sin embargo, en algunos casos, la expansión de las plantaciones de palma de aceite ha agravado las desigualdades sociales y el crecimiento económico generado por la cadena de producción de aceite de palma no siempre va acompañado de condiciones de trabajo decentes. En este contexto, el logro de algunos ODS a menudo se ve facilitado por la implementación de esquemas de certificación de sostenibilidad que tienen un papel clave en la mejora del desempeño socioeconómico y ambiental de la producción de aceite de palma. Esto conduce a mejores medios socioeconómicos de vida para las personas que viven en las zonas de producción en términos de condiciones de trabajo, infraestructura, servicios y salarios, con la consiguiente reducción de las tasas de pobreza, un aumento de la calidad de la educación y un mejor acceso a los sistemas de alimentación y salud.

Abstract

Palm oil is both the world's most-used vegetable oil and the most criticized for its environmental impact due to the observed reduction in tropical forest areas for its cultivation over the past decades. There is, however, very little discussion on the socio-economic implications associated with the production of palm oil. To contribute to a more informed debate, we conducted an in-depth review of the existing literature addressing the various socio-economic aspects of the production of palm oil, outlining its contribution to the achievement of the United Nations sustainable development goals (SDGs). The outcomes, findings and conclusions from 82 studies, published from 2010 onward, were considered as positive, negative, neutral or varied, and sometimes even contradicting, with regard to the contribution of palm cultivation and/or oil production to the achievement of a set of eight SDGs, selected to be those most related to socio-economic development, differentiating when possible, between sustainable and conventional production. The results show that it is difficult to draw uniform views, highlighting the nuances and varied facets of the contribution of palm oil to the eight SDGs, some of which are inevitably interconnected. In general, it emerges that palm oil plays a crucial role in boosting the economy and livelihoods of local communities in many developing producer countries, substantially contributing to poverty reduction and to food security. However, the expansion of oil palm plantations has, in some cases, exacerbated social inequalities, and the economic growth generated by the palm oil production chain is not always accompanied by decent working conditions. Against this backdrop, the achievement of some SDGs is often facilitated by the implementation of sustainability certification schemes that play a key role in improving the socio-economic and environmental performance of palm oil production. This leads enhanced socio-economic livelihoods for the people living in the production areas in terms of working conditions, infrastructure, services and wages, with a consequent reduction of poverty rates, an increase in education quality, as well as better access to food and healthcare systems.

1. Antecedentes

El aceite de palma es el aceite vegetal más utilizado en el mundo, representando más del 35 % de toda la

producción de aceite vegetal, seguido por el de soya (28 %), el de colza (12 %) y el de girasol (9 %) (FAOSTAT, 2021). Desde la segunda mitad del siglo XX ha habido un aumento exponencial en su producción,

que ha demostrado ser muy versátil (Qaim *et al.*, 2020); tanto es así que se ha convertido en un ingrediente común en muchos productos alimenticios, tales como margarina, galletas, pan, pasteles, chocolate, helados y productos no alimentarios como detergentes y cosméticos (Shimizu y Desrochers, 2012; Oosterveer, 2014; Kushairi *et al.*, 2017; Pacheco *et al.*, 2017). El aceite de palma también se ha utilizado históricamente como lubricante para maquinaria (Shimizu y Desrochers, 2012; Budidarsono *et al.*, 2013) y su uso como biocombustible en el sector energético ha crecido particularmente rápido (Silalertruksa *et al.*, 2012; Ofo-su-Budu y Sarpong, 2013; Khatun *et al.*, 2017; Muhammad *et al.*, 2019).

Hoy en día, el aceite de palma es al mismo tiempo el aceite vegetal más utilizado y más criticado del mundo. La controversia que lo llevó al centro del debate público y científico en los últimos años (Rist *et al.*, 2010; Cramb y Curry, 2012; Azhar *et al.*, 2017) fue su impacto ambiental y, particularmente, el vínculo entre su cultivo y la reducción de las áreas de bosque tropical durante las últimas décadas (Obidzinski *et al.*, 2012; Edwards, 2015; Moreno-Peñaranda *et al.*, 2015; Pacheco *et al.*, 2017; Sharma *et al.*, 2019; Lee *et al.*, 2020). De hecho, en las últimas décadas, la expansión del cultivo de palma de aceite ha llevado a la reducción de vastas áreas de bosques tropicales y al drenaje de algunas turberas naturales, causando la pérdida de importantes reservas de carbono forestales, el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero, la destrucción de hábitats naturales importantes, amenazas a la biodiversidad y el desencadenamiento de procesos de erosión del suelo (Dradjat, 2012; Schrier-Uijl *et al.*, 2013; Khatun *et al.*, 2017; Pacheco *et al.*, 2017; Lee *et al.*, 2020).

Aunque el concepto de sostenibilidad se concibe en tres dimensiones (ambiental, económica y social), el debate sobre el aceite de palma se centra en sus efectos sobre el medio ambiente y los servicios ecosistémicos y hay muy poca discusión sobre los impactos socioeconómicos asociados con su producción. Por lo tanto, el objetivo de este artículo es contribuir a un debate más informado y completo sobre el aceite de palma, considerando en particular los aspectos socioeconómicos de su producción menos investigados y discutidos. Con este objetivo en mente, realizamos una revisión sistemática de la literatura existente relevante que ha investigado sus implicaciones, dife-

renciando, cuando fue posible, los efectos del aceite de palma sostenible en comparación con el convencional. Los resultados, hallazgos y conclusiones de los estudios seleccionados fueron clasificados por los autores en términos de contribución al logro de un conjunto de 8 (los más relacionados con el desarrollo socioeconómico) de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible (ONU, 2015) adoptada por los Estados miembros de la ONU en 2015 como un plan para la paz y la prosperidad de las personas y el planeta.

La revisión presentada en este artículo ofrece una visión general bastante novedosa de los aspectos socioeconómicos relacionados con la producción de aceite de palma, abordando por primera vez su vínculo con los ODS, ya que solo existen unos pocos estudios similares en la literatura y no están directamente relacionadas con estos objetivos. Lee *et al.* (2020) discuten los objetivos ambientales y de desarrollo que se pueden lograr con la producción certificada de aceite de palma en Indonesia, y Purnomo *et al.* (2018) presentan investigaciones sobre el desarrollo de indicadores que pueden aportar al logro de los ODS. Sin embargo, ninguno de estos proporciona una evaluación exhaustiva de los aportes generales que puede dar el aceite de palma a su cumplimiento, que estén más relacionados con el desarrollo socioeconómico. Una revisión reciente realizada por Qaim *et al.* (2020) analiza las implicaciones del crecimiento de la producción de aceite de palma en los últimos años desde perspectivas ambientales, económicas y sociales, considerando aspectos importantes como la protección de la selva tropical, los derechos a ingresos y a propiedad sobre la tierra, los pequeños agricultores y la inclusión social, y la certificación de sostenibilidad. A pesar de la discusión presentada, el estudio no establece alguna referencia específica o vínculo directo en términos de aportes al logro de los ODS. Meijaard *et al.* (2020) revisaron los impactos ambientales del aceite de palma y sí vincularon sus hallazgos y resultados con estos. Sin embargo, en otro estudio, Meijaard y Sheil (2019) destacaron que una evaluación más completa de los efectos del aceite de palma debería considerar no solo los aspectos ambientales sino también la medida en que este puede beneficiar a las personas, considerando la influencia en la pobreza, el hambre y todos los factores incluidos en los 17 ODS.

1.1. Tendencias en la producción de aceite de palma

Una de las características de las plantaciones de palma de aceite es su alto rendimiento en términos de cantidad de aceite producido por unidad de área cultivada, con dos tipos diferentes de productos que se pueden extraer de su fruto: aceite de palma del fruto y, en cantidades más pequeñas (alrededor de 10 %), aceite de palmiste de las almendras del fruto, con un rendimiento promedio de 3-4 toneladas por hectárea de aceite de palma y 0,5 toneladas por hectárea de aceite de palmiste (Azhar *et al.*, 2017; FAOSTAT, 2021). Esto es hasta 10 veces más que cualquier otro aceite vegetal de uso común (Khatun *et al.*, 2017), indicando que requiere menos tierra que otros cultivos oleaginosos para obtener la misma cantidad de producto. Esta característica se confirma con los datos de la Base de Datos Estadísticos Corporativos de la Organización para la Alimentación y la Agricultura (FAOSTAT) que indican que, en 2019, aunque el cultivo de palma de aceite representaba más de 35 % de la producción mundial de aceite vegetal, ocupaba alrededor de 28 millones de hectáreas, que es menos de 10 % de la tierra utilizada para la producción de aceite vegetal en todo el mundo (FAOSTAT, 2021).

La producción mundial anual de aceite de palma en 2018 fue de alrededor de 80 millones de toneladas. Esto incluye tanto la de aceite de palma (90 %) como de aceite de palmiste (10 %) y representa un aumento de +55 % en comparación con la producción de 2010 (51,3 millones de toneladas) (FAOSTAT, 2021). Por lo tanto, la producción y el uso de aceite de palma están creciendo constantemente (Khatun, *et al.* 2017, FAOSTAT, 2021) y se espera que aumenten aún más (Corley, 2009) dado el ascenso constante de la demanda de alimentos y energía de la población mundial, que se espera supere los 10.000 millones de personas en 2050 (FIDA, 2014; FAO, 2015). Actualmente, Indonesia y Malasia son los mayores productores de aceite de palma, representando alrededor de 88 % de la producción mundial con 40,6 y 19,5 millones de toneladas, respectivamente, para 2018 (FAOSTAT, 2021). Estos países albergan la mayoría de las plantaciones de palma de aceite, con 14,7 y 5,2 Mha, respectivamente, aunque otras áreas tropicales, incluidas Tailandia, América Central y del Sur y África Occidental, han expandido reciente y rápidamente sus plantaciones de palma de aceite.

La creciente demanda de aceite de palma en el mercado internacional, junto con el aumento de la atención pública en cuanto a su impacto ambiental y social, han llevado a los diversos actores de su cadena de producción a crear conciencia sobre la necesidad de participar en métodos de producción más sostenibles que los utilizados convencionalmente. Esta nueva conciencia ha permitido el desarrollo de una serie de esquemas y protocolos de certificación, que se han ampliado con los años para incluir principios y criterios ambientales y socioeconómicos para la producción sostenible de aceite de palma. Entre el alto número de estándares y protocolos que abarcan la producción agroalimentaria sostenible o a la protección de los hábitats y la biodiversidad, algunos pueden aplicarse específicamente a la producción sostenible de aceite de palma (Yaap y Paoli, 2014; McInnes, 2017; Schlösser y Walter, 2020), abordando sus aspectos ambientales y socioeconómicos, ya sea directa o indirectamente (Tabla 1).

Según los datos de la Mesa Redonda sobre Aceite de Palma Sostenible (RSPO por sus siglas en inglés) (2021); uno de los esquemas de certificación más completos según lo informado por una serie de estudios que analizan y comparan los principales estándares de sostenibilidad para la producción agrícola (Yaap y Paoli, 2014; McInnes, 2017; Schlösser y Walter, 2020); actualmente 4,36 millones de las 28 millones de hectáreas cultivadas con palma de aceite en el mundo están certificadas como sostenibles, lo que representa un total de 17,6 millones de toneladas de aceite de palma y corresponde al 19 % de su producción mundial.

2. Métodos

La revisión sistemática de los aspectos socioeconómicos relacionados con la producción de aceite de palma presentada en este estudio está basada en investigaciones recientes que discuten una o más implicaciones socioeconómicas del aceite de palma o hacen referencia explícita a los ODS, posiblemente diferenciando entre la producción de aceite de palma sostenible y convencional. Con el objetivo de incorporar los más recientes, los autores decidieron incluir en la revisión los artículos publicados entre 2010 y 2020, con la única excepción de un estudio (Susila, 2004) que se mencionó como particularmente relevante en

Tabla 1. Selección de estándares existentes aplicables a la producción sostenible de aceite de palma.

Estándar	Descripción
Mesa Redonda sobre Aceite de Palma Sostenible (RSPO por sus siglas en inglés)	Una iniciativa sin fines de lucro y de múltiples partes interesadas, lanzada en 2004 con el objetivo de promover el crecimiento y el uso de productos sostenibles de aceite de palma a través de estándares globales creíbles y la participación de las partes interesadas, incluidos los productores, distribuidores, consumidores, minoristas, bancos e inversionistas, y organizaciones no gubernamentales ambientales y sociales. El estándar de certificación global para la producción sostenible de aceite de palma, RSPO, prevé operaciones en el campo y la gestión de la cadena de suministro de conformidad con las regulaciones, con bajo impacto ambiental, que son económica y socialmente ventajosas para los trabajadores y las comunidades locales. Actualizados en 2018, los principios y criterios de la RSPO están basados en 7 principios y 40 criterios (con los respectivos indicadores y directrices) organizados en 3 áreas de impacto (prosperidad, personas y planeta).
Aceite de Palma Sostenible de Indonesia (ISPO por sus siglas en inglés)	Norma de certificación obligatoria de Indonesia para la producción de aceite de palma sostenible, elaborada por el gobierno de Indonesia en 2011. Los criterios ISPO están alineados con los requisitos legales y reglamentarios existentes en Indonesia; es por eso por lo que también se conoce como el “estándar de legalidad” para el aceite de palma. ISPO prevé la aplicación de 7 principios, 28 criterios y 15 subcriterios, incluido un sistema de concesión de licencias y gestión de plantaciones, el cumplimiento de las directrices técnicas para el cultivo y procesamiento, la gestión y monitoreo ambiental, el respeto de las condiciones de los trabajadores y las comunidades locales, el fortalecimiento de las actividades económicas en las comunidades y el desarrollo de una economía sostenible.
Aceite de Palma Sostenible de Malasia (MSPO por sus siglas en inglés)	Norma de certificación obligatoria de Malasia para la producción sostenible de aceite de palma, elaborada por el gobierno de Malasia en 2013. Los criterios MSPO están alineados con los requisitos legales y reglamentarios existentes en dicho país. MSPO contiene 7 principios, cada uno con criterios e indicadores específicos, basados en los 3 pilares de la sostenibilidad, que garantizan una producción de aceite de palma económicamente viable, socialmente aceptable y respetuosa con el medio ambiente.
Grupo de Innovación en Aceite de Palma (POIG por sus siglas en inglés)	Una iniciativa de múltiples partes interesadas de 2013 que está basada en el estándar RSPO y promueve la adopción de prácticas sostenibles y responsables más estrictas e innovadoras en términos de responsabilidad ambiental, asociación con las comunidades locales, protección de los derechos de los trabajadores e integridad corporativa y de productos por parte de los actores clave en toda la cadena de producción del aceite de palma.
Rainforest Alliance: Estándar de Agricultura Sostenible (SAS por sus siglas en inglés)	Programa de certificación para productores que se dedican a la producción agrícola sostenible y a cadenas de suministro responsables, incluida la del aceite de palma. Está basada en 5 principios, con sus criterios respectivos, que prevén la elaboración y aplicación de un plan de gestión empresarial y de la cadena de suministro destinado a preservar la biodiversidad y los recursos naturales, mejorar los medios de subsistencia y el bienestar de los trabajadores y sus familias, incluidas las condiciones de trabajo adecuadas, los salarios, la atención médica, la seguridad y la protección de las relaciones con las comunidades locales.
Red de Agricultura Sostenible (SAN por sus siglas en inglés)	La red internacional de organizaciones no gubernamentales (ONG) se centró en ayudar a los agricultores, los trabajadores y las comunidades rurales a llevar a cabo su agenda de sostenibilidad de una manera práctica y eficiente. La red trabaja junto a Rainforest Alliance gestionando un sistema global para certificar la producción agrícola sostenible de empresas agrícolas y cadenas de suministro agrícolas responsables, incluida la del aceite de palma.
Mesa Redonda sobre Biomateriales Sostenibles (RSB por sus siglas en inglés)	Organización global e independiente de múltiples partes interesadas creada en 2011 con el objetivo de fomentar la producción sostenible de biocombustibles (incluido el biodiésel de palma de aceite) y otros biomateriales a través de prácticas sostenibles, certificación y asociaciones de cooperación. Se basa en la aplicación de una norma con 12 principios fundamentales, cada uno de los cuales está respaldado por un número variable de criterios, requisitos e indicadores, que abarcan 4 áreas (legal, social, ambiental y de gestión).
Enfoque de Altas Reservas de Carbono (HCS por sus siglas en inglés)	Un enfoque diseñado para permitir a las empresas agrícolas de diversos sectores, incluido el de la palma de aceite, cumplir con sus compromisos contra la deforestación, tanto en la etapa de producción en el campo como en toda la cadena de suministro. No es un esquema de certificación independiente y la mayoría de las compañías de aceite de palma que han aplicado el enfoque HCS también se han afiliado a RSPO.
Certificación Internacional de Sostenibilidad y Carbono (ISCC por sus siglas en inglés)	Sistema de certificación orientado a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, uso sostenible de la tierra, protección de la biósfera y sostenibilidad social, mediante la aplicación de un estándar a lo largo de toda la cadena de suministro en 3 áreas clave: energía, aplicaciones industriales y alimentos y piensos.

muchos artículos. Aunque la sostenibilidad abarca tres dimensiones (ambiental, económica y social), de acuerdo con el objetivo de este estudio de abordar específicamente las dimensiones socioeconómicas del aceite de palma, siendo los aspectos ambientales de la producción de aceite de palma ampliamente investigados en la literatura, se seleccionó un conjunto de ocho ODS considerando los más relacionados con el desarrollo socioeconómico, de acuerdo con el juicio de los autores y según lo sugerido también por Fonseca *et al.* (2020) y Niaz (2021):

- ODS 1: Fin de la pobreza
- ODS 2: Hambre cero
- ODS 3: Salud y bienestar
- ODS 4: Educación de calidad
- ODS 5: Igualdad de género
- ODS 6: Agua limpia y saneamiento
- ODS 8: Trabajo decente y crecimiento económico
- ODS 10: Reducción de las desigualdades

El sondeo de literatura se realizó en Google Scholar, utilizando términos de búsqueda en varias combinaciones. En concreto, se cruzaron las palabras clave “producción de aceite de palma” y “cultivo de palma de aceite” con los términos generales “impacto social”, “impacto económico”, “sostenibilidad”, “ODS” y con los siguientes términos específicos para facilitar la atribución de los estudios a cada ODS, con el mismo estudio aplicable a uno o más ODS si contenían los términos específicos asociados:

- ODS 1: pobreza, ingresos
- ODS 2: hambre, alimento, seguridad alimentaria
- ODS 3: salud, bienestar
- ODS 4: educación, escuela, estudiante
- ODS 5: género, mujeres
- ODS 6: agua, saneamiento
- ODS 8: trabajo, trabajadores, crecimiento económico, empleo, salario
- ODS 10: igualdad, desigualdad, conflicto social, discriminación, vulnerabilidad

A pesar de la triple dimensión ambiental-económica-social de la sostenibilidad, dado el enfoque bien definido de este artículo para abordar específicamen-

te solo las dimensiones socioeconómicas del aceite de palma, los términos relacionados con el impacto y la sostenibilidad ambientales no se incluyeron intencionalmente en la búsqueda de literatura, pues las preocupaciones ambientales ya han sido ampliamente discutidas.

Los autores leyeron completamente los artículos resultantes a los que tuvieron acceso (por ejemplo, en revistas de acceso abierto o suscritas por la institución de los autores) y luego los seleccionaron sobre la base de los criterios de exclusión que se enumeran a continuación. Los artículos excluidos:

- Proporcionan un enfoque en aspectos demasiado específicos, lo que no permite una evaluación de los impactos frente a cualquiera de los ODS seleccionados, como documentos sobre productos alimenticios particulares que contienen aceite de palma (Cova y D’Antone, 2016), campañas educativas (Ruggeri y Samoggia, 2018), sistemas de incentivos (Cramb, 2013) o aplicación de prácticas e innovaciones específicas en la cadena de valor (Ayinde *et al.*, 2012; Osei-Amponsah *et al.*, 2012; Ayawari *et al.*, 2018).
- Si bien tratan sobre los ODS de interés, centran su análisis de impacto en otros aspectos; por ejemplo, en estrategias de gobierno y políticas (Fuchs *et al.* 2011, Pesqueira y Glasbergen, 2013; van der Enden, 2013; Köhne, 2014; MacDonald, 2020) o aspectos ambientales (Gilbert, 2012; Silalertruksa *et al.*, 2017).
- Presentan un análisis comparativo de múltiples aceites vegetales, incluido el de palma, pero que no permite evaluar específicamente los efectos del aceite de palma en términos absolutos (German y Schoneveld, 2011; Fonjong y Gyapong, 2020).

De los 105 estudios publicados que se analizaron (lista completa en la información complementaria disponible en línea en stacks.iop.org/ERL/17/063007/mmedia), 82 fueron elegibles para ser incluidos en la revisión de acuerdo con los criterios de exclusión, diferenciados en artículos originales científicos (57), revisiones científicas (9) y documentos de trabajo (16). Una gran parte de los 82 estudios seleccionados se refiere a áreas de producción específicas, como el Sudeste Asiático, en particular Indonesia y Malasia (55), África (12) y América Latina (4), mientras que otros (11) analizan los aspectos socioeconómicos de

la producción mundial de aceite de palma (Tabla 2). Además, varios estudios analizan los aspectos socioeconómicos de la producción de aceite de palma certificado como sostenible con referencia a uno de los esquemas de certificación enumerados en la Tabla 1 (18) o hacen comparaciones entre producción sostenible y convencional (12). El resto de los estudios se refiere a la producción convencional o no especifica el método de producción (52) (Tabla 3).

Cabe señalar que todos los estudios revisados que se consideraron que abordaban el aceite de palma “sostenible” hacen referencia explícita a la producción sostenible certificada y, por el contrario, los es-

tudios que abordan el aceite de palma “convencional” se ocupan de la producción no certificada. Podría ser que algunos análisis se ocupen de la producción de aceite de palma de pequeños agricultores que, a pesar de aplicar prácticas sostenibles, no pueden pagar los costos de obtener una certificación, por lo que no se identifican y reconocen como “sostenibles”, aunque recientemente se han desarrollado enfoques simplificados para la certificación de aceite de palma sostenible para pequeños agricultores independientes (Meijaard y Sheil, 2019, Yap *et al.*, 2021). Sin embargo, cuando se menciona el aceite de palma sostenible en este estudio, se refiere a métodos de producción

Tabla 2. Lista de estudios analizados, con referencia a las áreas geográficas.

Área geográfica	Estudios
Sudeste Asiático (55)	Susila, 2004; McCarthy y Cramb, 2009; Feintrenie <i>et al.</i> , 2010; Rist <i>et al.</i> , 2010; Dayang Norwana <i>et al.</i> , 2011; Syahza <i>et al.</i> , 2011; Budidarsono <i>et al.</i> , 2012; Cramb y Curry, 2012; Dradjat, 2012; White y White, 2012; Majid Cooke, 2012; Obidzinski <i>et al.</i> , 2012; Shimizu y Desrochers, 2012; Silalertruksa <i>et al.</i> , 2012; Varkkey, 2012; Budidarsono <i>et al.</i> , 2013; Manik <i>et al.</i> , 2013; Schrier-Uijl <i>et al.</i> , 2013; Sinaga, 2013; Ludin <i>et al.</i> , 2014; Kamalrudin y Abdullah, 2014; Yaap y Paoli, 2014; Almam <i>et al.</i> , 2015; Alwarritzi <i>et al.</i> , 2015; Edwards, 2015; Comte <i>et al.</i> , 2015; Li, 2015; Moreno-Peñaranda <i>et al.</i> , 2015; Otieno <i>et al.</i> , 2016; UNICEF, 2016; Elmhirst <i>et al.</i> , 2017a; Elmhirst <i>et al.</i> , 2017b; Jelsma <i>et al.</i> , 2017; Kushairi <i>et al.</i> , 2017; Hidayat <i>et al.</i> , 2018; Dib <i>et al.</i> , 2018; Edwards, 2018; Li, 2018; Morgans <i>et al.</i> , 2018; Nambiappan, <i>et al.</i> 2018; Papilo <i>et al.</i> , 2018; Purnomo <i>et al.</i> , 2018; de Vos y Delabre, 2018; Acosta y Curt, 2019; Adiprasetyo <i>et al.</i> , 2019; Foong <i>et al.</i> , 2019; Jensen <i>et al.</i> , 2019; Muhammad <i>et al.</i> , 2019; Santika <i>et al.</i> , 2019; Sharma <i>et al.</i> , 2019; Sibhatu, 2019; Lee <i>et al.</i> , 2020; Purnomo <i>et al.</i> , 2020; Santika <i>et al.</i> , 2020; Sitepu <i>et al.</i> , 2020.
África (12)	Ayodele, 2010; Ibitoye <i>et al.</i> , 2011; Hoyle y Levang, 2012; Ofosu-Budu y Sarpong, 2013; Nkongho <i>et al.</i> , 2014; Ohimain <i>et al.</i> , 2014; Adebo <i>et al.</i> , 2015; Adesiji <i>et al.</i> , 2016; Bassey, 2016; Ahmed <i>et al.</i> , 2019; Balde <i>et al.</i> , 2019; Etuah <i>et al.</i> , 2020.
América Latina (4)	Mingorría <i>et al.</i> , 2014; Castellanos-Navarrete <i>et al.</i> , 2019; Grepalma, 2020; Furumo <i>et al.</i> , 2020.
Producción mundial (11)	Obire y Putheti, 2010; Persey <i>et al.</i> , 2011; Oosterveer, 2014; Potter, 2015; Pirker <i>et al.</i> , 2016; Azhar <i>et al.</i> , 2017; Khatun <i>et al.</i> , 2017; Pacheco <i>et al.</i> , 2017; Meijaard y Sheil, 2019; Pye, 2019; Qaim <i>et al.</i> , 2020.

Tabla 3. Lista de estudios analizados, con referencia al tipo de producción.

Tipo de producción	Estudios
Producción sostenible (18)	Persey <i>et al.</i> , 2011; Schrier-Uijl <i>et al.</i> , 2013; Kamalrudin y Abdullah, 2014; Ludin <i>et al.</i> , 2014; Oosterveer, 2014; Yaap y Paoli, 2014; Moreno-Peñaranda <i>et al.</i> , 2015; Khatun <i>et al.</i> , 2017; Kushairi <i>et al.</i> , 2017; Hidayat <i>et al.</i> , 2018; Papilo <i>et al.</i> , 2018; Purnomo <i>et al.</i> , 2018; Foong <i>et al.</i> , 2019; Grepalma, 2020; Meijaard y Sheil, 2019; Pye, 2019; Santika <i>et al.</i> , 2020; Sitepu <i>et al.</i> , 2020.
Comparación entre producción sostenible y convencional (12)	Cramb y Curry, 2012; Potter, 2015; Azhar <i>et al.</i> , 2017; Elmhirst <i>et al.</i> , 2017a; Jelsma <i>et al.</i> , 2017; Morgans <i>et al.</i> , 2018; Adiprasetyo <i>et al.</i> , 2019; Santika <i>et al.</i> , 2019; Sharma <i>et al.</i> , 2019; Furumo <i>et al.</i> , 2020; Lee <i>et al.</i> , 2020; Purnomo <i>et al.</i> , 2020.

sostenibles certificados que respetan los principios y criterios ambientales y socioeconómicos establecidos por estándares y protocolos reconocidos para la producción sostenible de aceite de palma (Tabla 1).

Los resultados, hallazgos y conclusiones de los estudios seleccionados se recopilaron en una base de datos y se clasificaron como marcadamente positivos, negativos o neutros con respecto a la contribución del aceite de palma al logro de los ocho ODS seleccionados (Tabla 4).

Cada estudio se clasificó con respecto al aporte del cultivo de palma y/o la producción de aceite de palma al logro de un ODS específico de la siguiente manera:

- Marcadamente positiva o negativa, cuando proporciona claramente una evaluación cualitativa (y a veces cuantitativa) positiva o negativa que destaca los beneficios o efectos perjudiciales sobre cuestiones específicas relacionadas con los ODS considerados.
- Neutral, cuando se trata de los ODS considerados con puntos de vista variados y, a veces, incluso contradictorios, o cuando se informa de una compensación entre aspectos positivos y negativos, sin relevancia de un aspecto sobre el otro.

Aunque los 17 ODS se conciben como un enfoque integrado para el desarrollo sostenible, este análisis aborda individualmente los 8 seleccionados y destaca, cuando sea apropiado, la interconexión entre ellos con el objetivo de proporcionar una visión general sobre cuáles son los temas más y menos investigados en relación con el aceite de palma y para los cuales se describen impactos positivos o negativos en la literatura.

3. Análisis de resultados y discusión

3.1 ODS 1: Fin de la pobreza

La revisión de la literatura mostró que muchos estudios coinciden en que el cultivo de palma de aceite contribuye positivamente al desarrollo socioeconómico de las comunidades locales, independientemente del país de producción o el enfoque utilizado, con un impacto sustancialmente positivo en la reducción de la pobreza y el crecimiento económico en las zonas rurales (Susila, 2004; Obire y Putheti, 2010;

Schrier-Uijl *et al.*, 2013; Kamalrudin y Abdullah, 2014; Edwards, 2018; Ahmed *et al.*, 2019). Los efectos de la reducción de la pobreza y el crecimiento económico son aún mayores para los pequeños productores que también logran cultivar otros productos junto con la palma de aceite (Feintrenie *et al.*, 2010; Fu *et al.*, 2010; Kremen *et al.*, 2012; Azhar *et al.*, 2017).

En los países en desarrollo, la tasa de pobreza de las comunidades dedicadas al cultivo de palma de aceite tiende a ser inferior a la media nacional (Etuah *et al.*, 2020), con ejemplos en Indonesia (Susila, 2004; Dradjat, 2012; Alwarritzi *et al.*, 2015; Edwards, 2018, Etuah *et al.*, 2020) y Nigeria (Ayodele, 2010; Adesiji *et al.*, 2016, Etuah *et al.*, 2020). Un estudio en particular (Edwards, 2015) muestra cómo un aumento de 10 % en el área de tierra dedicada al cultivo de palma de aceite produce una reducción de 10 % en la tasa de pobreza, lo que lleva a una disminución en la brecha de pobreza entre varias clases sociales (Edwards, 2015; Pacheco *et al.*, 2017), con mayores efectos de reducción de pobreza a corto plazo en plantaciones a gran escala que en plantaciones a pequeña escala (Edwards, 2015). Edwards (2019) informa que, este siglo, cerca de 2,6 millones de indonesios que viven en zonas rurales han salido de la pobreza gracias a la economía vinculada a la producción de aceite de palma (Meijaard y Sheil, 2019). Numerosas iniciativas que incentivan el cultivo de palma de aceite son promovidas localmente por los gobiernos, especialmente en Asia (Indonesia, Malasia, Tailandia, etc.) y África subsahariana (Ghana, Nigeria, Camerún, Costa de Marfil, Benín, etc.), como una herramienta clave para aliviar la pobreza, particularmente en las comunidades locales que viven en áreas rurales (Susila, 2004; Rist *et al.*, 2010; Syahza *et al.*, 2011; Ofosu-Budu y Sarpong, 2013; Sinaga, 2013; Nkongho *et al.*, 2014; Oosterveer, 2014; Potter, 2015; Pirker *et al.*, 2016).

En muchos países en desarrollo, la palma de aceite se considera un cultivo altamente rentable; de hecho, se define como un cultivo comercial, ya que se trabaja principalmente para ser vendido con fines de lucro, a diferencia de los cultivos básicos destinados a la subsistencia que se plantan principalmente para la familia de los productores o para alimentar a su ganado, superando a cualquier otro en términos de productividad y mano de obra requerida (Feintrenie *et al.*, 2010; Rist *et al.*, 2010; Harianto, 2019). La pal-

ma de aceite puede considerarse el cultivo oleaginoso más eficiente, ya que puede producir el mismo volumen de aceite vegetal en menos de 20 % del área requerida por otras plantaciones de oleaginosas, como la soya, la colza y el girasol (Persey *et al.*, 2011; Meijaard *et al.*, 2020). Además, desde el punto de vista de los recursos laborales, su cultivo solo requiere, en promedio, 0,2 años-hombre por hectárea (Corley y Tinker, 2016; Jelsma *et al.* 2017).

Lo que hace que la producción de aceite de palma sea una de las fuentes de ingreso más deseables y accesibles, con un impacto positivo en el desarrollo socioeconómico y la reducción de la pobreza, es

su mayor rentabilidad y su baja intensidad de mano de obra (Persey *et al.*, 2011; Jelsma *et al.*, 2017; Grepalma, 2020). Algunos estudios han demostrado que los agricultores de palma de aceite en Guinea tienen ingresos más estables que los que no cultivan palma de aceite u otros productos comerciales (Balde *et al.*, 2019; Qaim *et al.*, 2020); además, los pequeños productores cuya principal fuente de ingresos proviene del cultivo de palma de aceite tienen mejores indicadores financieros y de bienestar, así como tasas de malnutrición más bajas que los pequeños productores que no la cultivan (Dayang Norwana *et al.*, 2011; Budidarsono *et al.*, 2012).

Tabla 4. Lista de estudios analizados, desglosados según los ODS.

	Artículos	Revisiones científicas	Documentos de trabajo
ODS 1 (n = 41)	Susila, 2004; McCarthy y Cramb, 2009; Rist <i>et al.</i> , 2010; Syahza <i>et al.</i> , 2011; Cramb y Curry, 2012; Sinaga, 2013; Ohimain <i>et al.</i> , 2014; Oosterveer, 2014; Kamalrudin y Abudallah, 2014; Alwarritzi <i>et al.</i> , 2015; Adesiji <i>et al.</i> , 2016; Azhar <i>et al.</i> , 2017; Jelsma <i>et al.</i> , 2017; Ahmed <i>et al.</i> , 2019; Castellanos-Navarrete <i>et al.</i> , 2019; Meijaard y Sheil, 2019; Muhammad <i>et al.</i> , 2019; Pye, 2019; Santika <i>et al.</i> , 2019; Etuah <i>et al.</i> , 2020; Qaim <i>et al.</i> , 2020; Santika <i>et al.</i> , 2020. (n = 22).	Obire y Putheti, 2010; Persey <i>et al.</i> , 2011; Budidarsono <i>et al.</i> , 2012; Schrier-Uijl <i>et al.</i> , 2013; Potter 2015; Morgans <i>et al.</i> , 2018. (n = 6)	Ayodele, 2010; Feintrenie <i>et al.</i> , 2010; Dayang Norwana <i>et al.</i> , 2011; Dradjat, 2012; Ofosu-Budu y Sarpong, 2013; Nkongho <i>et al.</i> , 2014; Edwards, 2015; Li, 2015; Pacheco <i>et al.</i> , 2017; Edwards, 2018; Li, 2018; Adiprasetyo <i>et al.</i> , 2019; Grepalma, 2020. (n = 13)
ODS 2 (n = 27)	White y White, 2012; Budidarsono <i>et al.</i> , 2013; Manik <i>et al.</i> , 2013; Sinaga, 2013; Mingorría <i>et al.</i> , 2014; Alwarritzi <i>et al.</i> , 2015; Bassey, 2016; Azhar <i>et al.</i> , 2017; Khatun <i>et al.</i> , 2017; Ahmed <i>et al.</i> , 2019; Balde <i>et al.</i> , 2019; Castellanos-Navarrete <i>et al.</i> , 2019; Jensen <i>et al.</i> , 2019; Meijaard y Sheil, 2019; Santika <i>et al.</i> , 2019; Sharma <i>et al.</i> , 2019; Sibhatu, 2019; Qaim <i>et al.</i> , 2020; Santika <i>et al.</i> , 2020. (n = 19)	Budidarsono <i>et al.</i> , 2012. (n = 1)	Ayodele, 2010; Li, 2015; UNICEF, 2016; Elmhirst <i>et al.</i> , 2017a; Pacheco <i>et al.</i> , 2017; Li, 2018; Grepalma, 2020. (n = 7)
ODS 3 (n = 30)	Syahza <i>et al.</i> , 2011; Varkkey, 2012; Budidarsono <i>et al.</i> , 2013; Manik <i>et al.</i> , 2013; Mingorría <i>et al.</i> , 2014; Adebo <i>et al.</i> , 2015; Alwarritzi <i>et al.</i> , 2015; Moreno-Peñaranda <i>et al.</i> , 2015; Elmhirst <i>et al.</i> , 2017b; Nambiappan <i>et al.</i> , 2018; Acosta y Curt, 2019; Ahmed <i>et al.</i> , 2019; Castellanos-Navarrete <i>et al.</i> , 2019; Jensen <i>et al.</i> , 2019; Santika <i>et al.</i> , 2019; Sibhatu, 2019; Lee <i>et al.</i> , 2020; Qaim <i>et al.</i> , 2020; Santika <i>et al.</i> , 2020. (n = 19)	Shimizu y Desrochers, 2012; Schrier-Uijl <i>et al.</i> , 2013; Yaap y Paoli 2014; Potter, 2015; Kushairi <i>et al.</i> , 2017; Morgans <i>et al.</i> , 2018. (n = 6)	Feintrenie <i>et al.</i> , 2010, Elmhirst <i>et al.</i> , 2017a, Pacheco <i>et al.</i> , 2017, Li, 2018, Grepalma, 2020. (n = 5)
ODS 4 (n = 20)	Obidzinski <i>et al.</i> , 2012; Budidarsono <i>et al.</i> , 2013; Alwarritzi <i>et al.</i> , 2015; Adesiji <i>et al.</i> , 2016; Acosta y Curt, 2019; Santika <i>et al.</i> , 2019; Furumo <i>et al.</i> , 2020; Lee <i>et al.</i> , 2020; Qaim <i>et al.</i> , 2020; Santika <i>et al.</i> , 2020; Sitepu <i>et al.</i> , 2020. (n = 11)	Budidarsono <i>et al.</i> , 2012; Schrier-Uijl <i>et al.</i> , 2013; Yaap y Paoli, 2014. (n = 3)	Feintrenie <i>et al.</i> , 2010; Dayang Norwana <i>et al.</i> , 2011; UNICEF, 2016; Pacheco <i>et al.</i> , 2017; Li, 2018; Grepalma, 2020. (n = 6)

	Artículos	Revisiones científicas	Documentos de trabajo
ODS 5 (n = 16)	Ibitoye <i>et al.</i> , 2011; White y White, 2012; Adebo <i>et al.</i> , 2015; Moreno-Peñaranda <i>et al.</i> , 2015; Adesiji <i>et al.</i> , 2016; Bassey, 2016; Elmhirst <i>et al.</i> , 2017b; de Vos y Delabre, 2018; Castellanos-Navarrete <i>et al.</i> , 2019; Etuah <i>et al.</i> , 2020. (n = 10)	Yaap y Paoli, 2014. (n = 1)	Li, 2015 ; UNICEF, 2016; Elmhirst <i>et al.</i> , 2017a ; Li, 2018 ; Grepalma, 2020. (n = 5)
ODS 6 (n = 20)	Rist <i>et al.</i> , 2010; Cramb y Curry, 2012; Obidzinski <i>et al.</i> , 2012; Manik <i>et al.</i> , 2013; Comte <i>et al.</i> , 2015; Moreno-Peñaranda <i>et al.</i> , 2015; Nambiappan <i>et al.</i> , 2018; Foong <i>et al.</i> , 2019; Sharma <i>et al.</i> , 2019; Furumo <i>et al.</i> , 2020; Lee <i>et al.</i> , 2020; Santika <i>et al.</i> , 2020. (n = 12)	Yaap y Paoli 2014. (n = 1)	Dradjat, 2012 ; Li, 2015 ; UNICEF, 2016 ; Elmhirst <i>et al.</i> , 2017a ; Pacheco <i>et al.</i> , 2017, Li, 2018, Grepalma, 2020. (n = 7)
ODS 8 (n = 59)	Susila, 2004; Rist <i>et al.</i> , 2010; Ibitoye <i>et al.</i> , 2011; Cramb y Curry, 2012; Majid Cooke, 2012; Obidzinski <i>et al.</i> , 2012; Silalertruksa <i>et al.</i> , 2012, Budidarsono <i>et al.</i> , 2013, Manik <i>et al.</i> , 2013; Sinaga, 2013; Kamalrudin y Abdullah, 2014; Ludin <i>et al.</i> , 2014; Mingorría <i>et al.</i> , 2014; Ohimain <i>et al.</i> , 2014; Alam <i>et al.</i> , 2015; Alwarritzi <i>et al.</i> , 2015; Moreno-Peñaranda <i>et al.</i> , 2015; Adesiji <i>et al.</i> , 2016; Bassey, 2016; Otieno <i>et al.</i> , 2016, Pirker <i>et al.</i> , 2016; Elmhirst <i>et al.</i> , 2017b; Dib <i>et al.</i> , 2018; Nambiappan <i>et al.</i> , 2018; Papilo <i>et al.</i> , 2018; Purnomo <i>et al.</i> , 2018; Acosta y Curt, 2019; Balde <i>et al.</i> , 2019; Castellanos-Navarrete <i>et al.</i> , 2019; Muhammad <i>et al.</i> , 2019; Pye, 2019; Santika <i>et al.</i> , 2019; Sharma <i>et al.</i> , 2019; Furumo <i>et al.</i> , 2020; Purnomo <i>et al.</i> , 2020; Qaim <i>et al.</i> , 2020; Santika <i>et al.</i> , 2020, Sitepu <i>et al.</i> , 2020. (n = 38)	Obire y Putheti, 2010; Persey <i>et al.</i> , 2011; Shimizu y Desrochers, 2012; Schrier-Uijl <i>et al.</i> , 2013; Yaap y Paoli, 2014; Potter, 2015; Morgans <i>et al.</i> , 2018. (n = 7)	Ayodele, 2010; Feintrenie <i>et al.</i> , 2010; Dayang Norwana <i>et al.</i> , 2011; Dradjat, 2012; Hoyle y Levang, 2012; Ofosu-Budu y Sarpong, 2013; Nkongho <i>et al.</i> , 2014; Li, 2015; Pacheco <i>et al.</i> , 2017; Edwards, 2018; Li, 2018; Elmhirst <i>et al.</i> , 2017a; Adiprasetyo <i>et al.</i> , 2019; Grepalma, 2020. (n = 14)
ODS 10 (n = 30)	Susila, 2004; McCarthy y Cramb, 2009; Syahza <i>et al.</i> , 2011; Cramb y Curry, 2012; Manik <i>et al.</i> , 2013; Mingorría <i>et al.</i> , 2014; Oosterveer, 2014; Alam <i>et al.</i> , 2015; Bassey, 2016; Elmhirst <i>et al.</i> , 2017b; Jelsma <i>et al.</i> , 2017; Dib <i>et al.</i> , 2018; Hidayat <i>et al.</i> , 2018; Acosta y Curt, 2019; Castellanos-Navarrete <i>et al.</i> , 2019; Muhammad <i>et al.</i> , 2019; Santika <i>et al.</i> , 2019; Qaim <i>et al.</i> , 2020. (n = 18)	Persey <i>et al.</i> , 2011 ; Yaap y Paoli, 2014. (n = 2)	Feintrenie <i>et al.</i> , 2010; Dayang Norwana <i>et al.</i> , 2011; Dradjat, 2012; Hoyle y Levang, 2012; Nkongho <i>et al.</i> , 2014; Elmhirst <i>et al.</i> , 2017a; Pacheco <i>et al.</i> , 2017; Li, 2018; Adiprasetyo <i>et al.</i> , 2019; Grepalma, 2020. (n = 10)

Sin embargo, algunas publicaciones subrayan efectos positivos y negativos (McCarthy y Cramb, 2009; Cramb y Curry, 2012; Schrier-Uijl *et al.*, 2013; Li, 2015, 2018; Meijaard y Sheil 2019; Santika *et al.*, 2019, 2020). Aunque el cultivo de palma de aceite ha producido rendimientos económicos positivos, buenos niveles de empleo y una mejora general en el acceso a los servicios sociales para los pequeños productores y sus familias (Dayang Norwana *et al.*, 2011; Schrier-Uijl *et al.*, 2013; Ohimain *et al.*, 2014; Muhammad *et al.*, 2019), el cambio en el uso de la

tierra debido a la expansión del aceite de palma, particularmente para la producción de biocombustibles en Malasia, ha llevado a muchas comunidades locales y grupos étnicos a alejarse de sus estilos de vida tradicionales que fueron históricamente dependientes de los recursos naturales y los servicios ecosistémicos proporcionados por los bosques naturales (Dayang Norwana *et al.*, 2011). En particular, un estudio (Santika *et al.*, 2019) muestra que los impactos sociales de las plantaciones de palma de aceite no se pueden definir uniformemente, pero dependen en gran medida

de un número de variables, como las características específicas del sitio y las condiciones socioeconómicas de las comunidades locales antes del inicio del cultivo (Meijaard y Sheil, 2019; Santika *et al.*, 2019). Específicamente, las comunidades dedicadas al cultivo de palma de aceite ubicadas en aldeas con baja cubierta forestal, acostumbradas a comprar bienes de subsistencia en el mercado, mejoraron su bienestar socioeconómico gracias al desarrollo de plantaciones, en comparación con las aldeas sin palma de aceite (Santika *et al.*, 2019). El caso opuesto se observó en las plantaciones desarrolladas en aldeas remotas con mayor cobertura forestal, donde los medios de vida de las comunidades locales dependían de la cultura directa o la utilización de productos y servicios forestales. Estas comunidades se vieron obligadas a cambiar su estilo de vida en comparación con las comunidades vecinas que no habían participado en la cultura de la palma de aceite (Santika *et al.*, 2019, 2020). En general, las comunidades más consolidadas y establecidas desde hace mucho tiempo en el área tienden a resistir la tentación de abandonar las prácticas y la cultura tradicionales a cambio de los ingresos estables que puede proporcionar la producción de aceite de palma, ya que el cambio de uso de la tierra a favor de las plantaciones de palma de aceite plantea preocupaciones, especialmente con respecto al mantenimiento de la propiedad de la tierra y la seguridad en el sistema de regulación de la tierra (Dayang Norwana *et al.*, 2011). Un estudio señala que los pequeños agricultores corren el riesgo de verse afectados por tener que vender sus tierras, lo que puede ser necesario para la expansión de la palma de aceite. Por esta razón, la legislación nacional debe apoyarlos (Rist *et al.*, 2010; Nkongho *et al.*, 2014) a través del desarrollo de un sistema que incentive y regule el alquiler en lugar de la venta de la tierra (Rist *et al.*, 2010).

El impacto positivo o negativo del cultivo de palma de aceite también depende de los grupos sociales involucrados. Sus beneficios sociales y económicos generalmente se limitan a grupos sociales particulares, incluidos, por ejemplo, los pequeños agricultores que agregan palma de aceite a sus sistemas agrícolas, diversificando así sus sistemas de cultivo (Li, 2015). También se pueden producir diferentes efectos en términos sociales y económicos dependiendo de la relación entre los pequeños agricultores y las grandes empresas que administran las plantaciones (Castella-

nos-Navarrete *et al.*, 2019). Por ejemplo, los pequeños productores de palma de aceite (parcelas con un promedio de 2 ha) vinculados a grandes empresas por contratos de suministro son más vulnerables al empobrecimiento, principalmente debido a los bajos ingresos que reciben y que, en muchos casos, no son suficientes para cubrir los costos de manejo agrícola y los gastos básicos del hogar (Li, 2018). Como resultado, estos pequeños productores corren el riesgo de perder sus tierras y, por lo tanto, la capacidad de mantener su sustento. Esto, a su vez, conduce a un deterioro económico y social (Cramb y Curry, 2012; Li, 2015; Cramb y McCarthy, 2016). Por el contrario, el cultivo de palma de aceite administrado por pequeños productores independientes (ISH, por sus siglas en inglés) es más rentable que la opción descrita anteriormente, aunque requiere un desembolso inicial de capital significativo. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que el tamaño mínimo de una parcela de monocultivo debe ser de 6 ha para garantizar la productividad y satisfacer las necesidades familiares (Li, 2018).

Adiprasetyo *et al.* (2019) mostraron que, en general, los beneficios económicos y ambientales percibidos son mayores para los agricultores que adoptan la producción sostenible de aceite de palma que para los agricultores convencionales. Específicamente, un análisis realizado en Kalimantan (Indonesia) muestra que la aplicación de la certificación de la RSPO no produce una reducción de la pobreza, sino que podría estar relacionada con una desaceleración en el crecimiento de las tasas de pobreza (Morgans *et al.*, 2018). De acuerdo con Azhar *et al.* (2017), la mayoría del aceite de palma sostenible certificado en los mercados mundiales proviene de grandes plantaciones y solo una pequeña parte de pequeños productores; esto se debe principalmente a los altos costos de certificación, que no siempre se compensan con precios de venta más altos. Como resultado, a pesar de que los pequeños productores aplican prácticas tradicionales que a menudo son más amigables con la biodiversidad, no se les identifica ni se les reconoce como “sostenibles”. Algunos sistemas de certificación (RSPO y MSPO) buscan hacer que la certificación sea más accesible para los pequeños productores (Meijaard y Sheil 2019; Yap *et al.*, 2021) con la introducción en 2019 de una norma específica (estándar para ISH de RSPO) que apunta a una mayor inclusión de estos en el sistema de certificación de RSPO a través de un

enfoque simplificado para la producción de aceite de palma sostenible por parte de los pequeños agricultores independientes.

3.2 ODS 2: Hambre cero

Evaluar los efectos de la producción de aceite de palma en relación con el ODS 2 es un tema particularmente importante dado el hecho de que las estimaciones actuales muestran que casi 8,9 % de la población mundial (690 millones de personas) sufre de hambre y malnutrición (FAO, 2020) y que la mayoría de la población malnutrida del mundo se encuentra en Asia (381 millones) y África (250 millones), que son los países con más cultivos de palma de aceite.

La palma de aceite se considera un cultivo primario para muchos países desde una perspectiva económica, mientras que los efectos sobre la seguridad alimentaria pueden ser positivos o negativos (Santika *et al.*, 2019, 2020). Algunos estudios sostienen que la presencia de cultivos de palma de aceite ayuda a garantizar la seguridad alimentaria (Ayodele, 2010; Khatun *et al.*, 2017) y alivia la malnutrición (Budidarsono *et al.*, 2012; Khatun *et al.*, 2017). El aceite de palma también es un elemento clave en la dieta de muchas poblaciones locales. Un ejemplo es Tailandia, en el que representa aproximadamente 75 % de la ingesta de energía de aceite comestible (Kosulwat *et al.*, 2006; Jensen *et al.*, 2019), lo que lo hace un producto fundamental para la seguridad alimentaria (Rewtarkulpaiboon, 2015; Khatun *et al.*, 2017; Jensen *et al.*, 2019) debido a la mejora en la ingesta de calorías derivada de su consumo. Además, el aceite de palma también contribuye a la mejora de la nutrición de las poblaciones locales como resultado del aumento de los ingresos, lo que provoca un mayor gasto en alimentos y también debilitando efectivamente el papel de la producción de alimentos de subsistencia (Sibhatu y Qaim, 2018; Sibhatu, 2019; Qaim *et al.*, 2020). De acuerdo con una serie de estudios realizados en el sudeste de Asia, las ganancias del cultivo de palma de aceite contribuyen a una mejor seguridad alimentaria en los hogares de pequeños agricultores al proporcionar a las familias mayores medios económicos para comprar alimentos (Feintrenie *et al.*, 2010; Rist *et al.*, 2010; Cramb y Curry, 2012; Obidzinski *et al.*, 2012; Sibhatu, 2019; Qaim *et al.*, 2020). Además, en África, los estudios realizados en Guinea

(Balde *et al.*, 2019; Qaim *et al.*, 2020) y Ghana (Ahmed *et al.*, 2019; Qaim *et al.*, 2020) informan que los pequeños productores que cultivan palma de aceite tienen una mayor seguridad alimentaria que aquellos que no lo hacen, debido a mayores ingresos que les permiten gastar más en alimentos.

Sin embargo, los efectos positivos del cultivo de palma de aceite en términos de mayor seguridad alimentaria son particularmente buenos para los pequeños agricultores independientes que tienen la oportunidad de combinar la palma de aceite con otros cultivos, como arroz, caucho y verduras frescas en un sistema de cultivo mutuo sostenible (Fu *et al.*, 2010; Kremen *et al.*, 2012; Li, 2015, 2018; Azhar *et al.*, 2017; Grepalma, 2020), lo que garantiza una dieta variada y acceso directo a diferentes tipos de alimentos. Por otro lado, los pequeños agricultores que adoptan el sistema de monocultivo de palma de aceite se ven obligados a depender del mercado para la compra de alimentos, abandonando la agricultura de subsistencia y, en consecuencia, generando un mayor gasto de los hogares para su adquisición, lo que lleva a una caída en la seguridad alimentaria para toda la familia (Sinaga, 2013; Alwarritzi *et al.*, 2015). Un estudio realizado en aldeas indonesias mostró que en los lugares donde la palma de aceite es la principal fuente de ingresos, las tasas de desnutrición son más bajas que en las fincas donde no se cultiva (Budidarsono *et al.*, 2012). Sin embargo, el aumento de los ingresos no siempre conduce a mejores niveles de seguridad alimentaria, que también depende de muchos otros factores, como la disponibilidad de alimentos o la eficiencia de los mercados (Mingorría *et al.*, 2014; Alwarritzi *et al.*, 2015; Pacheco *et al.*, 2017; Elmhirst *et al.*, 2017a; Hamann, 2018; Castellanos-Navarrete *et al.*, 2019).

Además, si bien en algunos casos la producción de aceite de palma mejora las condiciones socioeconómicas de los pequeños productores y, por lo tanto, su seguridad alimentaria y el acceso a los alimentos a nivel local, también podría plantear un problema de seguridad alimentaria, principalmente debido al riesgo de que áreas agrícolas enteras se conviertan en monocultivos de palma de aceite (Pacheco *et al.*, 2017; Sharma *et al.*, 2019). Una posible solución podría ser la intensificación sostenible como un compromiso para evitar la expansión de la palma de aceite en el futuro (Manik *et al.*, 2013; Elmhirst *et al.*,

2017b; Sharma *et al.*, 2019). En la misma línea, algunos estudios destacan el controvertido papel, en lo que respecta a la seguridad alimentaria, del cultivo de palma de aceite, especialmente en relación con la producción de biocombustibles (Meijaard y Sheil, 2019), lo que podría aumentar el riesgo de competencia entre los usos de la tierra y su acaparamiento (Bassey, 2016; Onoja *et al.* 2017). Otra investigación sostiene que el aumento de la tierra convertida para el cultivo de palma de aceite en Indonesia podría conducir a una rápida urbanización de las áreas que rodean las plantaciones; esto, junto con la migración que a menudo acompaña a dicha expansión, podría representar un riesgo para la seguridad alimentaria de los pequeños agricultores y sus familias (Budidarsono *et al.*, 2013). Este hallazgo se ve confirmado por el hecho de que, según algunas opiniones públicas, las poblaciones indígenas son las más afectadas por la expansión de la palma de aceite en términos de seguridad alimentaria (Manik *et al.*, 2013; Mingorría *et al.*, 2014; UNICEF, 2016), ya que están más expuestas a los cambios en sus hábitos alimenticios, variando de las dietas tradicionales altas en proteínas (carne y pescado) a las basadas en alimentos menos nutritivos. Esto se debe principalmente al considerable compromiso, en términos de tiempo, requerido para que los pequeños productores cultiven la palma de aceite en detrimento de la agricultura de subsistencia, creando así una mayor dependencia del mercado no solo para la venta de aceite de palma sino también para la compra de alimentos. Estos aspectos afectan principalmente a las mujeres (Julia y White, 2012; Elmhirst *et al.*, 2017a) y a los niños (UNICEF, 2016).

3.3 ODS 3: Salud y bienestar

Desde el punto de vista del acceso a los beneficios sociales, varios estudios sostienen que el cultivo de palma de aceite aumenta la posibilidad de acceso a la atención médica para las familias de pequeños productores, debido principalmente al aumento de los medios económicos a su disposición gracias a sus ingresos (Feintrenie *et al.*, 2010; Rist *et al.*, 2010; Cramb y Curry, 2012; Varkkey, 2012; Adebo *et al.*, 2015; Alwarritzi *et al.*, 2015; Potter, 2015; Elmhirst *et al.*, 2017b; Sibhatu, 2019; Qaim *et al.*, 2020). En particular, varias investigaciones (Syahza *et al.*, 2011; Gatto *et al.*, 2017; Edwards, 2019) han encontrado

que este cultivo ha llevado, indirectamente, a la mejora de las instalaciones de salud en Indonesia. Este es un elemento clave para garantizar un acceso más equitativo a los servicios nacionales de salud del país (Efendi, 2012; Budidarsono *et al.*, 2013; Pacheco *et al.*, 2017; Grepalma, 2020). Después de analizar una muestra de 516 fincas en toda Indonesia, 60 % de las cuales estaban totalmente dedicadas al cultivo de la palma de aceite, el estudio encontró que las fincas dominadas por la palma de aceite tienen un buen desempeño en muchos indicadores de desarrollo, como escuelas, carreteras, ingresos, acceso a electricidad y acceso a instalaciones de salud. Una encuesta (Acosta y Curt, 2019) realizada en un área boscosa en Papúa (Indonesia) confirmó los principales beneficios sociales que aporta el cultivo de palma de aceite, pero también señaló la pérdida irreversible de las ventajas proporcionadas por los bosques. Sin embargo, un estudio realizado por Santika y otros (2019) señala que los efectos de la industria del aceite de palma en el bienestar no siempre se distribuyen equitativamente entre los indonesios y pueden depender de las características específicas del sitio o de la situación socioeconómica preexistente de las poblaciones antes del desarrollo del cultivo de la palma de aceite. En algunos lugares que cultivan palma de aceite hay una tasa más baja de mejora en el bienestar social y ambiental que en los que no lo hacen, independientemente de la ubicación y los medios de vida básicos de la comunidad. Además, muchas comunidades sufren impactos negativos en el bienestar general debido a ciertos factores como la explotación y la alienación laboral (Manik *et al.*, 2013; Mingorría *et al.*, 2014). Se intentan superar los problemas descritos anteriormente mediante la aplicación de estándares de certificación de sostenibilidad, razón por la cual se han dedicado varios estudios a una comparación de los impactos de varios enfoques de producción sostenible en la salud y el bienestar (Yaap y Paoli, 2014; McInnes, 2017). Uno en particular (Morgans *et al.*, 2018) comparó el impacto en la salud de las plantaciones certificadas y no certificadas por la RSPO en algunas poblaciones de Borneo indonesio. Dado que las instalaciones de salud per cápita en las áreas que rodean las plantaciones, tanto certificadas como no certificadas han ido disminuyendo progresivamente desde el año 2000, mientras que la población en las aldeas que rodean las plantaciones ha estado creciendo, un estudio determinó que la certificación de sostenibilidad en rea-

lidad no aumentó el acceso a la atención médica en términos relativos o absolutos, sino que simplemente ralentizó su declive (Morgans *et al.*, 2018).

Santika *et al.* (2020) también evaluaron el impacto de la certificación RSPO en el bienestar en los distritos de Indonesia al monitorear los cambios en 18 indicadores de bienestar socioeconómico y socioecológico. El estudio muestra que la conexión entre la certificación de la RSPO y el bienestar a nivel de aldea varía dependiendo de la ubicación y las condiciones nutricionales básicas de la misma antes de la plena implementación de los principios y criterios de certificación. Los impactos son positivos en las aldeas donde la mayoría de la comunidad ya estaba comprando productos básicos en el mercado antes de la certificación, mientras que la certificación de la RSPO se ha asociado con resultados negativos en las áreas rurales orientadas a la agricultura de subsistencia. Además, el mismo estudio sostiene que las mejoras en el bienestar fueron más evidentes en lugares donde las plantaciones habían sido certificadas por más tiempo, lo que confirma que algunos beneficios de la certificación de sostenibilidad tienden a surgir a largo plazo. Algunos análisis realizados en Indonesia (Lee *et al.*, 2020) y Malasia (Nambiappan *et al.*, 2018) muestran que los esquemas de certificación de sostenibilidad, como RSPO y MSPO, contribuyen a la conservación del medio ambiente a corto plazo, pero tienen un impacto limitado en el desarrollo rural. Por lo tanto, deberán realizarse más investigaciones de los impactos a largo plazo de la certificación en el entorno y las comunidades.

Los aspectos negativos que surgen del análisis de los estudios incluyen el impacto que los enfoques convencionales de la producción de palma de aceite tienen en la salud de los trabajadores de las plantaciones (Ahmed *et al.*, 2019; Castellanos-Navarrete *et al.*, 2019) debido, particularmente en Indonesia, al uso de productos químicos peligrosos, a las pesadas cargas de trabajo, los accidentes laborales y a la atención médica inadecuada proporcionada por las empresas (Moreno-Peñaranda *et al.*, 2015). Específicamente, las trabajadoras están más expuestas a graves riesgos para la salud debido a los plaguicidas (Li, 2018). Schrier-Uijl *et al.* (2013) también identificaron un riesgo ambiental adicional para la salud humana en la quema de biomasa vegetal para despejar la tierra para el cultivo de palma de aceite. Hay muchas ini-

ciativas en los países productores de aceite de palma que promueven el bienestar de los ciudadanos. Por ejemplo, en Guatemala se ha logrado un aumento significativo del bienestar a través de la inversión en programas de salud y seguridad alimentaria, atención médica en hospitales, servicios médicos en plantaciones disponibles para los trabajadores y los miembros de la comunidad, programas médicos comunitarios, servicios de ambulancia, así como programas de capacitación en salud y nutrición (Grepalma, 2020).

3.4 ODS 4: Educación de calidad

Garantizar una educación de calidad inclusiva y equitativa y promover oportunidades de aprendizaje permanente para todas las personas es una parte clave de la Agenda de Desarrollo Sostenible, que promueve la educación de calidad en todos los niveles (ONU, 2015). La educación se considera un factor esencial para mejorar la producción agrícola, particularmente con miras a la sostenibilidad y la equidad social (Li, 2018; Furumo *et al.*, 2020). De hecho, se ha demostrado que un alto nivel de alfabetismo permite una mejor comprensión y posterior mejora de las prácticas agrícolas relacionadas con la producción de aceite de palma, incluida la implementación de innovaciones y tecnologías (Ibitoye *et al.*, 2011; Adesiji *et al.* 2016). Dos análisis sociotécnicos de las plantaciones de aceite de palma en Indonesia muestran que las personas que trabajan en la producción de aceite de palma tienden a tener una educación deficiente o esta no está relacionada con el sector agrícola (Alwarritzi *et al.*, 2015; Sitepu *et al.*, 2020). Esta condición ralentiza la transición hacia la producción sostenible (Sitepu *et al.* 2020). La creación de plantaciones de palma de aceite a menudo va seguida del desarrollo de una serie de infraestructuras, como carreteras, instalaciones de atención médica y, sobre todo, instalaciones educativas (Feintrenie *et al.*, 2010; Budidarsono *et al.*, 2012, 2013; Obidzinski *et al.*, 2012; Schrier-Uijl *et al.*, 2013; Pacheco *et al.*, 2017; Grepalma, 2020; Qaim *et al.*, 2020). La mayoría de las grandes compañías de aceite de palma en Malasia están involucradas en la construcción de escuelas para proporcionar educación a los hijos de sus trabajadores, generando así un impacto positivo en el nivel de vida de los empleados y sus familias (Dayang Norwana *et al.*, 2011). Dos estudios importantes (Santika *et al.*,

2019, 2020) también han correlacionado el impacto de las plantaciones de palma de aceite con los hábitos de las poblaciones en la obtención de alimentos básicos. Estas investigaciones mostraron que, donde las poblaciones ya estaban orientadas al mercado en la adquisición de alimentos básicos, el acceso a la infraestructura, incluida la educación y la salud, tendió a ser mejor que en las que estaban orientadas a obtener dichos alimentos básicos de manera directa. La producción sostenible de aceite de palma presta especial atención a los procesos educativos (Lee *et al.*, 2020). En particular, Yaap y Paoli (2014) observaron que cuatro de las normas más importantes en la promoción del aceite de palma sostenible en Indonesia (RSPO, ISPO, ISCC y SAN) requieren que las compañías del sector garanticen el acceso a la educación para los niños que viven en las áreas que rodean las plantaciones. Sin embargo, un estudio indica que, a menudo, dicho apoyo es ofrecido por las compañías de aceite de palma a la población local para compensar y contrarrestar parcialmente las posibles secuelas negativas que podrían resultar del cambio de uso de la tierra que trae consigo el establecimiento de las plantaciones de palma de aceite (Acosta y Curt, 2019). El mismo estudio señala que la compensación que las empresas de las plantaciones proporciona a la población local en términos de beneficios adicionales (por ejemplo, educación y salud) siempre debería ser mayor que los perdidos como resultado de la plantación de los cultivos de palma de aceite (Acosta y Curt, 2019). Otra publicación destacó que en Indonesia, debido al desarrollo del sector del aceite de palma, las empresas manufactureras a menudo brindan acceso a las escuelas primarias y secundarias para los hijos de sus empleados, facilitando también el transporte, particularmente a las instalaciones educativas ubicadas en áreas rurales remotas (UNICEF, 2016). Sin embargo, el mismo, también señala que, a veces, la calidad de la educación proporcionada está por debajo de los estándares públicos porque los maestros están mal remunerados y no están bien capacitados (UNICEF 2016).

3.5 ODS 5: Igualdad de género

La mayoría de los estudios que abordan cuestiones de género relacionadas con la producción de aceite de palma se han realizado en Indonesia y África. Por ejemplo, Li (2015) aplicó una perspectiva de género

para analizar los impactos de la palma de aceite en hombres y mujeres de diferentes grupos sociales. Se tuvieron en cuenta los dos modelos principales de cultivo de palma de aceite: plantaciones a gran escala que emplean trabajadores ocasionales y permanentes, y parcelas a pequeña escala, tanto independientes como vinculadas a grandes compañías de aceite de palma. Algunos de los impactos en las mujeres incluyeron la pérdida de la tierra que utilizaron para la agricultura de subsistencia (Li, 2015; Moreno-Peñaranda *et al.*, 2015), una mayor dificultad para adquirir parcelas de tierra para el cultivo, la vulnerabilidad laboral en las plantaciones (Li, 2015; Elmhirst *et al.*, 2017a, 2017b; Castellanos-Navarrete *et al.*, 2019) y la limitación de los derechos laborales relacionados con el género, como la licencia de maternidad y los descansos para la lactancia materna (UNICEF, 2016). Solo en el modelo de producción con pequeñas parcelas independientes las mujeres conservan algunos derechos, como participar en la toma de decisiones de la gestión agrícola, compartir los beneficios con sus maridos y tener los mismos derechos de propiedad sobre la tierra (Li, 2018).

En general, los trabajadores hombres y mujeres en el cultivo de palma de aceite suelen tener diferentes responsabilidades: los hombres son empleados principalmente para actividades de cosecha, mientras que las mujeres son empleadas para tareas esporádicas, como el desmalezado o la aplicación de fertilizantes, pero se ven obligadas a aceptar condiciones más precarias y salarios más bajos que sus homólogos masculinos (Li, 2015; Elmhirst *et al.*, 2017a, 2017b). Algunos estudios (White y White, 2012; Li, 2015; Elmhirst *et al.*, 2017a, 2017b) destacan aún más las diferencias de género, resaltando que las mujeres son generalmente excluidas de participar en los procesos de toma de decisiones, como los acuerdos de transferencia de tierras o la estipulación de condiciones de trabajo. White y White (2012) también señalan cómo el advenimiento de las compañías de aceite de palma ha provocado cambios en los sistemas de propiedad de la tierra en las zonas rurales a favor de los hombres “que se ganan el pan”, lo que restringe el acceso de las mujeres a la misma. Estas limitaciones también afectan su participación en la distribución de cualquier beneficio generado por los procesos de desarrollo de la palma de aceite (Ibitoye *et al.*, 2011; Bassey, 2016; Elmhirst *et al.*, 2017a). Las mujeres ge-

neralmente responden a tales obstáculos utilizando estrategias alternativas que demuestran su resiliencia y adaptabilidad a las circunstancias cambiantes (de Vos y Delabre, 2018).

Las condiciones descritas anteriormente se confirman en un estudio (DTE, 2014) realizado en un área de producción en Papúa (Indonesia) que enumeró varias condiciones difíciles para las mujeres como la inestabilidad laboral, la pérdida de acceso a tierras agrícolas y recursos forestales, y los altos precios de los alimentos. Por el contrario, otro estudio realizado en Bungo (Indonesia) analizó datos desglosados por género sobre la participación en la toma de decisiones sobre el uso de la tierra y encontró que la conversión de áreas agroforestales en plantaciones para cultivos comerciales, como el caucho y la palma de aceite, fue esencialmente una decisión tomada por hombres y mujeres en conjunto con el propósito de aumentar su acceso mutuo al capital (Feintrenie *et al.*, 2010; Therville *et al.*, 2011).

Otras investigaciones, realizadas principalmente en África y América del Sur, sostienen que la producción de palma de aceite ha tenido efectos positivos en la igualdad de género. Un estudio (Adebo *et al.*, 2015) realizado en una pequeña provincia de Nigeria muestra que las mujeres que participan en la producción de aceite de palma tienden a compartir una serie de características socioeconómicas recurrentes: la mayoría están casadas, son relativamente jóvenes, tienen un bajo nivel de alfabetismo y, ante todo, trabajan en pequeñas fincas de menos de dos hectáreas. El estudio muestra una mejora en los ingresos y el nivel de vida de las mujeres involucradas en la producción de aceite de palma, concluyendo que los esfuerzos para promover el empleo de las mujeres en este sector provocarían una reducción en las tasas de pobreza entre estas y sus familias, especialmente en las zonas rurales. El mismo estudio registra impactos positivos en términos de igualdad de género a lo largo de toda la cadena de producción del aceite de palma, desde la plantación hasta el procesamiento y la comercialización, así como entre los diferentes tipos de actores involucrados en la cadena, como agricultores/productores, procesadores, distribuidores y consumidores. En términos generales, las mujeres tienden a emplearse con más frecuencia en la fase de procesamiento de la fruta de palma y en las actividades de comercialización para las empresas, lo que

sugiere un nivel diverso de participación de género a lo largo de la cadena de producción (Omonona y Agboje, 2013; Adesiji *et al.*, 2016; Elmhirst *et al.*, 2017a, 2017b). Otro estudio realizado en Ghana (Etuah *et al.*, 2020) concluye que participar en las actividades de palma de aceite contribuye positivamente al empoderamiento de las mujeres, pero aún existen muchas desigualdades entre ellas y los hombres en la cadena de suministro.

Varias iniciativas están promoviendo políticas transversales en Guatemala para prevenir la discriminación de género, fomentar la creación de comités de género que funcionen como un mecanismo para el diálogo, la protección y el apoyo de las trabajadoras con el fin de salvaguardar sus derechos y promover sus intereses dentro de las grandes empresas en la cadena de suministro de aceite de palma (Grepalma, 2020).

Los aspectos de género se tienen en cuenta en la producción de aceite de palma sostenible. En particular, las iniciativas de múltiples partes interesadas (como RSPO) han aumentado sus esfuerzos en los últimos años para salvaguardar los derechos de las trabajadoras en la economía de la palma de aceite (Elmhirst *et al.*, 2017a). Un estudio comparativo (McInnes, 2017) de las posturas existentes más importantes para la sostenibilidad de la palma de aceite (RSPO, ISCC, ISPO, MSPO, SAN, HCS y RSB) reveló que todas tienen criterios que prohíben la discriminación, pero las definiciones de lo que constituye discriminación varían ampliamente de un estándar a otro. Con respecto a la protección de las mujeres, ISCC, RSB, ISPO y MSPO no contienen criterios específicos (McInnes, 2017), mientras que RSPO y HCS promueven un enfoque de producto sensible al género, por ejemplo, incluyendo criterios y mecanismos para proteger a las mujeres del acoso sexual en el lugar de trabajo (Yaap y Paoli, 2014; McInnes, 2017; Elmhirst *et al.*, 2017a) y desarrollando, en el caso de RSPO, una guía práctica sobre inclusión y cumplimiento de género, aprobada en 2021 para integrar los principios y criterios RSPO 2018 y el estándar ISH 2019.

3.6 ODS 6: Agua limpia y saneamiento

En las últimas décadas, la expansión de la palma de aceite ha llevado a la conversión de los bosques, con efectos perjudiciales sobre los servicios ecosistémicos.

nicos, la pérdida de biodiversidad y la reducción de la calidad del agua (Pacheco *et al.*, 2017, Elmhirst *et al.*, 2017a). Muchos estudios reportan impactos negativos en el Sudeste Asiático (particularmente en Indonesia) donde el cultivo convencional de la palma de aceite es reconocido como la principal causa de contaminación del agua (Muyibi *et al.*, 2008). En Indonesia se utilizan grandes cantidades de fertilizantes en el cultivo convencional de palma de aceite (FAO, 2005) y el efluente de la planta de beneficio de aceite de palma (POME) también es una descarga contaminante del agua (Wu *et al.*, 2010; Moreno-Peñaranda *et al.*, 2015) que puede degradar los ecosistemas acuáticos (Comte *et al.*, 2015; de Jong *et al.*, 2015; Moreno-Peñaranda *et al.*, 2015). Este cultivo también puede causar la erosión del suelo, especialmente cuando los doseles de las palmas en las plantaciones aún no han alcanzado su pleno desarrollo (Lee *et al.*, 2012). En estos casos, el suelo erosionado puede ingresar a los cuerpos de agua, degradando su calidad (Cramb y Curry, 2012; Obidzinski *et al.*, 2012).

La expansión del cultivo de la palma de aceite también corre el riesgo de competir con la agricultura local al reducir la disponibilidad de tierra cultivable y agua para la agricultura de subsistencia, que es crucial para algunos pueblos indígenas (Oosterveer, 2014). Un ejemplo de esto es la expansión de las plantaciones de palma de aceite en la región de Tripa (Indonesia), lo que ha llevado a la escasez de agua para los campos de arroz (Tata *et al.*, 2010). Estudios adicionales realizados en varias áreas de Indonesia muestran una relación entre la expansión de la palma de aceite y los impactos negativos en la disponibilidad y calidad del agua, con consecuencias directas sobre la disponibilidad de agua potable para las poblaciones locales (Li, 2015; 2018; Moreno-Peñaranda *et al.*, 2015). Esto, a su vez, tiene consecuencias en la salud pública (Rist *et al.*, 2010; Dradjat, 2012; Manik *et al.*, 2013; Moreno-Peñaranda *et al.*, 2015).

En este sentido, un informe de UNICEF (UNICEF, 2016) describe el impacto negativo en la calidad del agua causado por las plantaciones de palma de aceite en Indonesia como resultado de la lixiviación de plaguicidas y agroquímicos, la descarga de la contaminación por POME e hidrocarburos en los ríos. Esto ha llevado a la reducción del acceso de las comunidades locales a importantes fuentes de agua potable, con consecuencias negativas para la salud, en

particular la de los niños. El estudio subraya la necesidad de abordar el desarrollo sostenible en el sector del aceite de palma con miras a lograr los ODS de la Agenda 2030. Un estudio realizado en Borneo Occidental (Indonesia) sobre los impactos de la expansión de la palma de aceite mostró una menor disponibilidad de agua en un escenario sin cambios en comparación con un escenario de intensificación sostenible, donde las plantaciones solo se habían establecido en áreas adecuadas para la expansión. La producción sostenible proporcionaba más servicios ecosistémicos que el escenario habitual sin afectar significativamente los rendimientos de los cultivos de aceite de palma, pero la calidad del hábitat sufrió degradación en ambos escenarios (Sharma *et al.*, 2019). Además, se informó que la implementación de prácticas de manejo integrado en las plantaciones de palma de aceite, incluido el uso de tecnologías de recolección y almacenamiento de agua y la protección por medio de zonas de amortiguación ribereñas (Luke *et al.*, 2019), fue clave para lograr la sostenibilidad en la industria de la palma de aceite (Nambiappan *et al.*, 2018, Foong *et al.*, 2019). Los principales estándares de producción sostenible reconocidos internacionalmente (RSPO, ISCC, SAN e ISPO) incluyen criterios para los derechos del agua y el uso compartido de los recursos hídricos (Yaap y Paoli, 2014). En particular, la norma de certificación RSPO establece una serie de principios destinados a reducir la contaminación del agua y criterios específicos para identificar y monitorear objetivos y metas para reducir los impactos y mejorar la calidad de la misma (Lord y Clay, 2006, Furumo *et al.*, 2020, Lee *et al.*, 2020, Santika *et al.*, 2020).

3.7 ODS 8: Trabajo decente y crecimiento económico

El ODS 8 es el más discutido en los estudios analizados, pues 59 de 82 artículos abordan estos aspectos. Teniendo en cuenta la relevancia y la complejidad de los temas bajo este ODS, esta sección se estructura diferenciando los impactos del aceite de palma en 2 de sus subtemas.

3.7.1 Trabajo decente

El sector del aceite de palma ha creado importantes oportunidades de empleo e ingresos en las zonas

rurales de muchos países, lo que compensa la lenta absorción de mano de obra en las zonas urbanas. Los trabajadores de las fincas medianas y grandes se clasifican en categorías permanentes, estacionales u ocasionales según las tareas realizadas (por ejemplo: siembra, deshierbe, aplicación de fertilizantes, cosecha y limpieza de canales), mientras que los pequeños agricultores se clasifican según el origen, con diferencias entre inmigrantes y nativos. Como regla general, las condiciones de los trabajadores permanentes en las plantaciones a gran escala son mejores que las de los permanentes en las medianas. Además, los salarios de los trabajadores permanentes de las plantaciones tienden a ser más altos y más regulares que los ingresos económicos de los pequeños agricultores (Pacheco *et al.*, 2017). Según un estudio realizado en Colombia (Furumo *et al.*, 2020), los salarios son más altos si las plantaciones tienen certificación de sostenibilidad. El inconveniente de las certificaciones de producción sostenible es el costo de obtenerlas, que a menudo está fuera del alcance de los pequeños propietarios, lo que hace que sea financieramente accesible únicamente para grandes plantaciones que operan en un régimen de monocultivo principalmente orientado a fines de lucro (Azhar *et al.*, 2017).

Sin embargo, algunos estudios destacan los aspectos negativos del empleo en la cadena de suministro del aceite de palma. Los problemas reportados son variados y, en las grandes plantaciones, están principalmente relacionados con bajos salarios de los trabajadores (Majid Cooke, 2012; Manik *et al.*, 2013; Sinaga, 2013; Kaur, 2014; Li, 2015; Bassey, 2016; Castellanos-Navarrete *et al.*, 2019; Pye, 2019; Santika *et al.*, 2020); las precarias fórmulas de empleo casual utilizadas para reducir los costos laborales (Manik *et al.*, 2013; Li, 2015, 2018); los bajos impuestos que pagan las empresas, que no compensan los costos relacionados con el desarrollo local (Santika *et al.*, 2019) y las condiciones laborales de las mujeres que a menudo se ven obligadas a trabajos mal pagados, ocasionales e incluso peligrosos (Elmhirst *et al.*, 2017a; Li, 2018). La negación de los derechos básicos de los trabajadores (Manik *et al.*, 2013; Sinaga, 2013; Kaur, 2014; Pye, 2019) y las dificultades de los pequeños agricultores para acceder a la tierra (Castellanos-Navarrete *et al.*, 2019). Además, el desarrollo de la palma de aceite ha generado tanto migraciones internas, de las zonas más pobladas a

las rurales, debido principalmente a la demanda de trabajadores estacionales (Pye *et al.*, 2012), como migraciones internacionales como la de Indonesia a las plantaciones de Malasia para compensar la escasez de mano de obra en este país (Tirtosudarmo, 2009). Estas migraciones han generado otros aspectos negativos, como el fenómeno de los trabajadores que migran hacia áreas con plantaciones sin sus respectivas familias, una situación que potencialmente resulta en la fragmentación familiar (Kaur, 2014; Li, 2018) y la migración de trabajadores, a menudo ilegales, de otros países (Majid Cooke, 2012; Kamalrudin y Abdullah, 2014; Kaur, 2014; Ludin *et al.*, 2014; Pye 2019).

Para limitar estos efectos negativos es importante que todas las partes interesadas que están involucradas en la cadena de producción, junto con los políticos, inversionistas y la sociedad civil, se pongan de acuerdo sobre la necesidad de una producción responsable de aceite de palma que evite la conversión de los ecosistemas naturales, maximice los servicios ecosistémicos, respete la tierra y, sobre todo, garantice la redistribución justa de los beneficios socioeconómicos (Persey *et al.*, 2011; Schrier-Uijl *et al.*, 2013; Elmhirst *et al.*, 2017a; Edwards, 2018; Sitepu *et al.*, 2020). Por ejemplo, de acuerdo con una serie de estudios realizados en Indonesia, la implementación de un enfoque sostenible para el cultivo de palma de aceite por parte de los pequeños productores a través de la adopción de esquemas de certificación permanente como ISPO y RSPO conduce no solo a mayores beneficios sociales que la producción convencional, sino también a mejores resultados económicos (Morgans *et al.*, 2018; Adiprasetyo *et al.*, 2019). Es importante señalar que los criterios contenidos en los esquemas de certificación de producción sostenible no solo abordan el cumplimiento de los estándares de empleo y migración, sino que también se refieren a otros servicios, como capacitación, vivienda, suministro de agua, electricidad, seguros (Dayang Norwana *et al.*, 2011) y otros servicios sociales básicos como atención en salud y educación (Obidzinski *et al.*, 2012). En particular, en 2019, RSPO publicó la primera guía de la industria titulada *Guía de salarios dignos* para los trabajadores de la palma de aceite con el propósito de evaluar la adecuación de los salarios pagados para garantizar condiciones de vida dignas para el personal y sus familias.

3.7.2 Crecimiento económico

Los aportes del aceite de palma al crecimiento económico, especialmente en las zonas rurales, han aumentado considerablemente a lo largo de los años (McCarthy y Cramb, 2009; Budidarsono *et al.*, 2013; Azhar *et al.*, 2017; Pacheco *et al.*, 2017; Sharma *et al.*, 2019). Los datos más destacados se refieren a la contribución sustancial del desarrollo del aceite de palma al crecimiento económico de los países productores, creando empleos y aumentando los ingresos para todos los actores de la cadena de producción (Susila, 2004; Dayang Norwana *et al.*, 2011; Hoyle y Levang, 2012; Ohimain *et al.*, 2014; Moreno-Peñaranda *et al.*, 2015; Potter, 2015; Adesiji *et al.*, 2016; Elmhirst *et al.*, 2017a; Edwards, 2018; Muhammad *et al.*, 2019; Purnomo *et al.*, 2020; Qaim *et al.*, 2020; Sitepu *et al.*, 2020). Algunos estudios sostienen que también es posible mantener el crecimiento económico y laboral asociado con el desarrollo de la industria de la palma de aceite implementando prácticas sostenibles que no solo proporcionan ingresos para los gobiernos nacionales, las empresas y los pequeños agricultores, sino también las protecciones ambientales requeridas (Yaap y Paoli, 2014; Pirker *et al.*, 2016; Purnomo *et al.*, 2018, 2020; Grepalma, 2020).

A lo largo de los años, la expansión del sector de la palma de aceite se ha convertido en un tema controvertido, que no solo ha tenido varios impactos sociales y ambientales negativos (Foong *et al.*, 2019), sino también beneficios relacionados con la generación de ganancias fiscales para los países productores (Dradjat, 2012; Otieno *et al.*, 2016; Pacheco *et al.*, 2017; Nambiappan *et al.*, 2018) e ingresos para los grandes y pequeños terratenientes involucrados en las cadenas de producción (Feintrenie *et al.*, 2010; Rist *et al.*, 2010; Dradjat, 2012; Silalertruksa *et al.*, 2012; Budidarsono *et al.*, 2013; Ofosu-Budu y Sarpong, 2013; Mingorría *et al.*, 2014; Alam *et al.*, 2015; Alwarritzi *et al.*, 2015; Pacheco *et al.*, 2017; Elmhirst *et al.*, 2017; Dibib *et al.*, 2018; Papilo *et al.*, 2018; Acosu-Budu y Sarpong, 2013; Mingorría *et al.*, 2019; Alam *et al.*, 2015; Alwarritzi *et al.*, 2015; Pacheco *et al.*, 2017; Elmhirst *et al.*, 2017; Dibib *et al.*, 2017; Papilo *et al.*, 2018; Acosta y Curt, 2019; Balde *et al.*, 2019).

Teniendo en cuenta las diferentes áreas geográficas de producción analizadas en los estudios existentes, la producción de aceite de palma es mucho

más limitada en África que en los países del Sudeste Asiático, principalmente por un sistema agroforestal tradicional que permite a los pequeños agricultores diversificar su producción (Potter, 2015). En África, el procesamiento de aceite de palma se lleva a cabo principalmente utilizando sistemas artesanales locales, como plantas de beneficio tradicionales, que generan oportunidades de empleo y ayudan a diversificar los ingresos (Ayodele, 2010; Nkongho *et al.*, 2014; Pacheco *et al.*, 2017; Qaim *et al.*, 2020). Además de esta producción artesanal, también hay algunos esquemas de mediana y gran escala que abastecen a los mercados nacionales sin satisfacer la demanda total, que se compensa con la importación de aceite de palma de los más competitivos económicamente de Malasia e Indonesia. En estos dos países, el sector se expandió entre los años sesenta y setenta (Ibitoye *et al.*, 2011), ayudado por las políticas de la esfera pública y las estructuras institucionales y privadas que facilitaron la inversión a lo largo de toda la cadena de producción (Pacheco *et al.*, 2017). En América del Sur, el sector de producción de aceite de palma solo comenzó a desarrollarse a principios de la década de 2000, con la única excepción de Colombia, donde comenzó en la década de 1990 (Rueda-Zárate y Pacheco, 2015).

No cabe duda de que la expansión del cultivo de palma de aceite a nivel mundial ha acelerado los problemas de deforestación, especialmente en Malasia e Indonesia (Pacheco *et al.*, 2017), pero también ha contribuido al crecimiento económico de los gobiernos nacionales, lo que ha llevado a mayores ingresos y niveles de empleo a nivel local, y a efectos indirectos en términos del desarrollo de servicios e infraestructura en áreas de producción (Shimizu y Desrochers, 2012; Pacheco *et al.*, 2017; Dib *et al.*, 2018). Aunque la expansión del cultivo de palma de aceite se ha convertido en una opción rentable para muchos pequeños agricultores (Obire y Putheti, 2010), este cultivo a menudo solo está disponible para los que pueden permitirse el capital inicial para desarrollar nuevas plantaciones. Los agricultores de las comunidades indígenas a menudo han tenido tan poco capital disponible (Rist *et al.*, 2010) que muchos se han visto obligados a renunciar a sus tierras, vendiéndolas a terratenientes más grandes para hacer frente al aumento de los precios de los alimentos y el creciente costo de vida (Pacheco *et al.*, 2017).

El desarrollo de plantaciones de palma de aceite con las instalaciones de procesamiento de fruta relacionadas genera impactos positivos en las realidades locales al acelerar el mejoramiento de la infraestructura (construcción de carreteras, instalaciones de salud y educación) y estimular la economía. El desarrollo de cultivos comerciales como el aceite de palma también ha impulsado una transición de la agricultura de subsistencia a la producción orientada al mercado, y este cambio ha generado mayores oportunidades de empleo (Budidarsono *et al.*, 2013). También es interesante observar los hallazgos de un estudio realizado en la provincia de Riau, Sumatra (Indonesia) que observó un aumento de la riqueza y la inversión en el sector no agrícola en algunas poblaciones dedicadas al cultivo de palma de aceite (Budidarsono *et al.*, 2013; Löffler *et al.*, 2014).

En una comparación de los sistemas agrícolas se encontró que los pequeños agricultores que cultivan palma de aceite bajo un régimen de monocultivo tienden a ganar más que aquellos que combinan cultivos tradicionales y comerciales a través de la agricultura diversificada; esto está impulsando la transición de los sistemas agroforestales tradicionales a monocultivos de palma de aceite (Feintrenie *et al.*, 2010).

3.8 ODS 10: Reducción de las desigualdades

La existencia de desigualdades en el sector de la producción de aceite de palma puede deberse a diferentes causas y grupos de personas. Los elementos principales de la desigualdad se refieren a los hombres frente a las mujeres, los pequeños agricultores frente a los productores a gran escala y las poblaciones indígenas frente a los productores a gran escala. Un estudio realizado en la provincia de Riau (Indonesia) también informa sobre la existencia de desigualdades económicas entre las zonas rurales y urbanas (Syahza *et al.*, 2011). Este sostiene que para reducir estas desigualdades, todos los actores de la cadena de suministro de palma de aceite deben participar, desde las comunidades locales hasta los agentes económicos y los gobiernos locales, para convencer a las poblaciones locales de los efectos potencialmente positivos del desarrollo sostenible de las plantaciones de palma de aceite; es decir, aumentos potenciales en los ingresos y los consiguientes aumentos en el poder

adquisitivo. Estos efectos tienen el poder de mejorar todo el sistema de bienestar de las áreas rurales.

Según Li (2018), no es posible lograr el desarrollo sostenible a menos que todos tengan los recursos necesarios para lograr el bienestar; por lo tanto, no se puede lograr sin equidad social. Con demasiada frecuencia, la relación costo-beneficio relacionada con la expansión de la palma de aceite difiere en función de la clase social, la comunidad de origen, la edad y el género (Dayang Norwana *et al.*, 2011; Jelsma *et al.*, 2017; Elmhirst *et al.*, 2017a; Li, 2018; Castellanos-Navarrete *et al.*, 2019), por lo que se requiere con urgencia un marco institucional para ayudar a los pequeños agricultores y mejorar la distribución de beneficios en el sector (Elmhirst *et al.*, 2017a; Li, 2018; Grepalma, 2020; Qaim *et al.*, 2020). Según un estudio de Acosta y Curt (2019), los inversionistas y el gobierno indonesio comparten alrededor de 80 % de los beneficios generados por las plantaciones de palma de aceite, mientras que solo 14 % de los beneficios (infraestructura, empleo, educación y salud) va a las poblaciones locales. Otro estudio muestra que la expansión del cultivo de palma de aceite en Indonesia ha provocado mejoras en el nivel de vida de los pequeños agricultores en ciertas áreas, pero que también ha generado costos económicos y sociales (Santika *et al.*, 2019) debido a las crecientes desigualdades en la distribución de beneficios que, en la mayoría de los casos, solo se comparten entre los agricultores ricos y los migrantes cualificados, lo que da lugar a desigualdades sociales y marginación (Obidzinski *et al.*, 2012; Oosterveer 2014; Muhammad *et al.*, 2019).

Además, los productores a gran escala a menudo han expandido sus plantaciones sin llevar a cabo las consultas previas requeridas con las poblaciones locales (Sheil *et al.*, 2009; Feintrenie *et al.*, 2010; Rist *et al.*, 2010; Nkongho *et al.*, 2014), generando conflictos con las comunidades indígenas (Cramb y Curry, 2012; Hoyle y Levang, 2012; Oosterveer, 2014; Abram *et al.*, 2017; Pacheco *et al.*, 2017). En Malasia e Indonesia, la expansión de las plantaciones de palma de aceite en áreas más remotas también ha llevado a que los pueblos indígenas sean desplazados de sus tierras nativas (Alam *et al.*, 2015; Hidayat *et al.*, 2018). Un informe del Banco Mundial (Persey *et al.*, 2011) señala que los conflictos entre comunidades indígenas y empresas a menudo han surgido debido a ambigüedades en los derechos que rigen el uso de los recursos y la tierra

(Dradjat, 2012; Mingorría *et al.*, 2014; Elmhirst *et al.*, 2017b; Hidayat *et al.*, 2018; Qaim *et al.*, 2020). Además, Onoja y otros (2017) subrayan la existencia de una tendencia peligrosa de acaparamiento de tierras para la expansión de la palma de aceite en toda África (Nkongho *et al.*, 2014; Bassey, 2016). Es por eso por lo que los esquemas de certificación de sostenibilidad centran su atención en la necesidad de involucrar a las comunidades locales en los procesos de toma de decisiones. La RSPO, por ejemplo, incluye un requisito obligatorio para obtener el consentimiento libre, previo e informado de las comunidades locales antes de comenzar cualquier tipo de proyecto (Yaap y Paoli, 2014). Otra desigualdad se genera por el hecho de que no todos los agricultores tienen la misma posibilidad de acceder al capital y la tierra, y aquellos que tienen disponibilidad de tierra y capital se benefician más del cultivo de palma de aceite que aquellos que se ven obstaculizados por limitaciones y dificultades en este sentido (Krishna *et al.*, 2017; Dib *et al.*, 2018). La falta de acceso al capital a menudo puede obligar a los pequeños agricultores a vender sus tierras (McCarthy, 2010; Manik *et al.*, 2013; Dib *et al.*, 2018). Santika *et al.* (2019, 2020) también demuestran que los impactos socioeconómicos de la expansión de la palma de aceite difieren dependiendo de las características específicas del lugar de las poblaciones y, en particular, las condiciones socioeconómicas básicas de estas antes de la expansión del cultivo. Según algunos estudios, la adopción de prácticas para la producción sostenible de aceite de palma conlleva mayores beneficios económicos, ambientales y sociales que la producción convencional. Estos son percibidos por los propios agricultores (Elmhirst *et al.*, 2017a; Adiprasetyo *et al.*, 2019). Otro estudio (Yaap y Paoli 2014) que analiza cuatro estándares de certificación (RSPO, ISCC, ISPO y SAN) muestra que los cuatro contienen reglas y principios destinados a prevenir cualquier forma de discriminación por motivos de raza, género, clase social, orientación sexual, discapacidad o afiliación política.

4. Resumen sinóptico

El análisis muestra claramente las estrechas conexiones entre los diversos ODS. Por ejemplo, el aporte significativo de la producción de aceite de palma a la reducción de la pobreza (ODS 1) está estrechamente

relacionado con el logro de otros objetivos como el crecimiento económico (ODS 8), una mejor salud y bienestar (ODS 3), la reducción de la malnutrición (ODS 2) y la educación de calidad (ODS 4); aunque esto no siempre corresponde al logro de otros objetivos, como el trabajo decente (ODS 8), la igualdad de género (ODS 5) y la reducción de las desigualdades (ODS 10). Un resultado importante de este análisis es el claro vínculo entre la producción de aceite de palma y el desarrollo socioeconómico de las comunidades locales, donde se ha observado un aporte directo a la reducción de la pobreza y el crecimiento económico con el consiguiente aumento de la seguridad alimentaria en términos de acceso físico, social y económico a alimentos suficientes, seguros y nutritivos, especialmente en las zonas rurales (Susila, 2004; Obire y Putheti, 2010; Schrier-Uijl *et al.*, 2013; Kamalrudin y Abdullah, 2014; Edwards, 2018, Ahmed *et al.*, 2019) y con mayores beneficios para los pequeños productores que cultivan palma de aceite en asociación con otros cultivos (Feintrenie *et al.*, 2010; Fu *et al.*, 2010; Kremen *et al.*, 2012; Azhar *et al.*, 2017). De hecho, los agricultores independientes que logran combinar palmas de aceite con otros cultivos como arroz o verduras frescas tienen más posibilidades de garantizar la seguridad alimentaria y aliviar la malnutrición con acceso a una dieta variada y diferentes tipos de alimentos (Ayodele, 2010; Fu *et al.*, 2010; Budidarsono *et al.*, 2012; Kremen *et al.*, 2012; Li, 2015, 2018; Azhar *et al.*, 2017; Khatun *et al.*, 2017; Grepalma, 2020).

También se encontró que el logro de algunos de los ODS a menudo se ve facilitado por la implementación de prácticas sostenibles de producción de aceite de palma. Esto se aplica en particular al aumento de la educación de calidad (ODS 4), una mejor salud y bienestar (ODS 3) y el acceso al agua limpia y al saneamiento (ODS 6), que a menudo se denominan cobeneficios del cultivo sostenible de plantaciones de palma de aceite.

Sin embargo, muchos elementos de desigualdad social exacerbados por la expansión de las plantaciones de palma de aceite emergen de este análisis, principalmente en relación con el conflicto que surge sobre el acceso a la tierra y los problemas de propiedad entre las comunidades locales y las empresas que administran las vastas áreas de plantación (Sheil *et al.*, 2009; Feintrenie *et al.*, 2010; McCarthy, 2010;

Rist *et al.*, 2010; Cramb y Curry, 2012; Hoyle y Levang 2012; Manik *et al.*, 2013, Nkongho *et al.*, 2014; Oosterveer, 2014; Abram *et al.*, 2017; Krishna *et al.*, 2017; Pacheco *et al.*, 2017; Dib *et al.*, 2018). Además, de este análisis se desprende que el crecimiento económico generado por la producción de aceite de palma no siempre está acompañado por condiciones de trabajo decentes con salarios de trabajadores demasiado bajos en algunos casos (Majid Cooke, 2012; Manik *et al.*, 2013; Sinaga, 2013; Kaur, 2014; Li 2015; Bassey, 2016; Castellanos-Navarrete *et al.*, 2019; Pye, 2019; Santika *et al.*, 2020), fórmulas precarias de empleo estacional utilizadas para reducir los costos laborales (Manik *et al.*, 2013; Li, 2015, 2018), bajos impuestos pagados por las empresas que no compensan los costos relacionados con el desarrollo local (Santika *et al.*, 2019) y las peores condiciones de trabajo para las mujeres, que a menudo se ven obligadas a trabajos ocasionales mal pagados e incluso peligrosos (Elmhirst *et al.*, 2017a; Li, 2018).

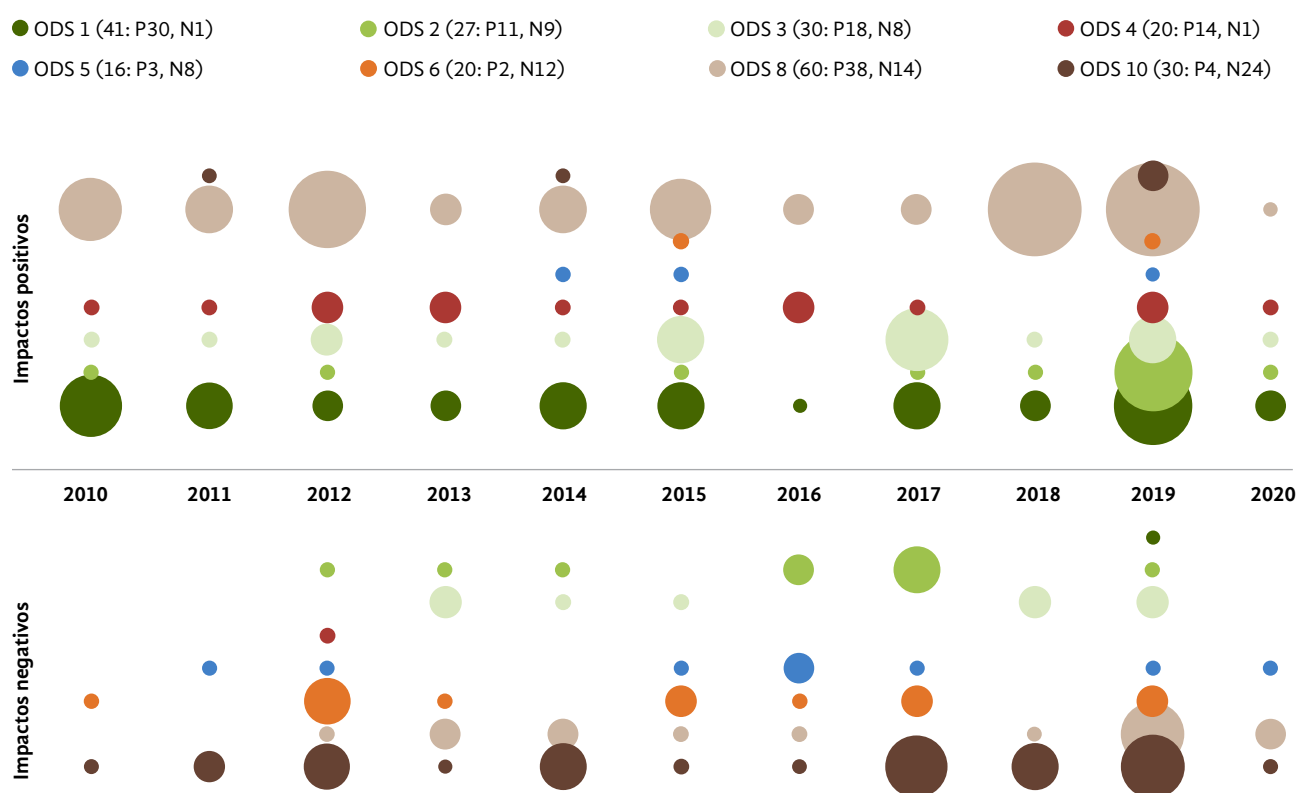
La Figura 1 muestra una representación gráfica de una selección de los 82 estudios analizados, informando solo aquellos que mencionan un impacto marcadamente positivo o marcadamente negativo para cada ODS (el número total de estudios para cada ODS, así como el número de los estudios seleccionados que informan un efecto marcadamente positivo (P) o negativo (N) se informan entre paréntesis en la figura), según el año de publicación. De acuerdo con el objetivo de este análisis de identificar los aportes positivos y/o negativos del aceite de palma a los ODS socioeconómicos, los estudios que informaron posiciones neutras no se incluyeron en el gráfico, ya que complicarían la visualización gráfica y no agregarían evidencia útil para evaluar los resultados genéricos positivos o negativos para cada ODS.

Lo que se desprende claramente del gráfico en la Figura 1 es que, para algunos ODS, las esferas son más grandes (por ejemplo, ODS 1, ODS 2, ODS 3, ODS 8 y ODS 10), lo que indica que el número de estudios que abordan esos temas principales específicos es mayor que para otros a los que se presta menos atención en la literatura. Además, en general, las esferas más grandes están por encima de la línea, mostrando una ponderación previa de los análisis que indican impactos marcadamente positivos en comparación con el número de estudios que informan

impactos marcadamente negativos, con una tendencia que parece haber aumentado particularmente en los últimos años, culminando en 2019. El aumento del número de estudios que informan efectos positivos registrados en los últimos años podría estar relacionado con el crecimiento del volumen de aceite de palma sostenible certificado, que según los datos de RSPO (RSPO 2021) hoy representa el 19 % de la producción total. En consecuencia, el mayor número de impactos positivos en los indicadores socioeconómicos informados por los estudios más recientes puede deberse a la producción sostenible, lo que refleja lo que se desprende claramente del análisis general de los estudios: la implementación de esquemas sostenibles de producción de aceite de palma permite mejorar muchos indicadores del impacto socioeconómico relacionado con la expansión del cultivo de palma de aceite (Santika *et al.*, 2019).

Teniendo en cuenta que el objetivo de este análisis es proporcionar una visión general de los impactos positivos y/o negativos descritos en la literatura para los aspectos socioeconómicos relacionados con el aceite de palma, parece bastante claro que, en general, su producción tiene implicaciones positivas para la reducción de la pobreza (ODS 1), hambre cero (ODS 2), salud y bienestar (ODS 3), educación de calidad (ODS 4) y trabajo decente y crecimiento económico (ODS 8), cuyas esferas están en general por encima de la línea (Figura 1). Por el contrario, la producción de aceite de palma parece afectar negativamente a otros ODS, como la igualdad de género (ODS 5), el agua limpia y saneamiento (ODS 6) y la reducción de las desigualdades (ODS 10), con esferas más grandes principalmente por debajo de la línea de meta. Se observa una tendencia particular para los estudios que abordan el ODS 8, que se compone de dos subtemas diferentes relacionados con el trabajo decente y el crecimiento económico, a menudo afectados de manera diferente por la producción de aceite de palma. En general, se ha observado que los estudios que informan implicaciones positivas se refieren principalmente al crecimiento económico garantizado por la producción de aceite de palma, mientras que los estudios que informan impactos negativos se refieren principalmente a las malas condiciones de trabajo en las plantaciones de aceite de palma.

Figura 1. Distribución de los estudios según el año de publicación y el impacto para cada ODS: positivo (por encima de la línea) o negativo (por debajo de la línea). Para cada ODS, el número total de estudios, así como el número seleccionado de estudios que informan resultados marcadamente positivos (P) o el efecto marcadamente negativo (N) se informan entre paréntesis. Las esferas del mismo color se refieren al mismo ODS. El tamaño de la esfera es proporcional al número de estudios. La distribución a lo largo del eje x indica el año de publicación de los estudios analizados. El posicionamiento a lo largo del eje y es simplemente un recurso para minimizar el solapamiento de las esferas y no indica un impacto positivo o negativo mayor o menor



5. Conclusión

Es difícil sacar conclusiones y unificar puntos de vista a partir de la revisión de la literatura existente. La gran cantidad de documentos analizados ofrece perspectivas diferentes, a veces incluso contradictorias, que ponen de manifiesto los matices y las diversas facetas de la contribución del aceite de palma a los ocho ODS, algunos de los cuales están inevitablemente interconectados. Estas consideraciones tam-

bién son confirmadas por un estudio muy reciente publicado por Ayompe *et al.* (2020). En general, la mayoría de las investigaciones analizadas concuerdan con el hecho de que el cultivo de palma de aceite desempeña un papel crucial en el impulso de la economía y los medios de vida de las comunidades locales en muchos de los países en vías de desarrollo que lo producen. Lo que se desprende del análisis de las publicaciones es que la producción de aceite de palma hace un aporte significativo a la reducción de

la pobreza al aumentar la seguridad alimentaria, es decir, el acceso físico, social y económico a alimentos suficientes, seguros y nutritivos para satisfacer las necesidades de los individuos y las comunidades. Sin embargo, algunos de los documentos analizados sostienen que, en ciertos casos, la expansión de las plantaciones de palma de aceite ha exacerbado las desigualdades sociales, debido principalmente a los conflictos que surgen sobre el acceso a la tierra y los problemas de propiedad entre las comunidades locales y las empresas que administran las vastas áreas de plantación. Además, según la literatura existente, el crecimiento económico generado por la cadena de producción de aceite de palma no siempre está acompañado por condiciones de trabajo decentes: el trabajo tiende a ser pesado y agotador, se usan productos químicos dañinos, los trabajadores no están protegidos y los salarios son bajos. Sin embargo, es importante señalar que muchas de las evaluaciones realizadas en este análisis deben considerarse en el contexto de los países donde se realizaron los estudios, dado que muchos de los aspectos más negativos informados están vinculados a circunstancias tradicionales, culturales, políticas y socioeconómicas independientemente del sector del aceite de palma. De hecho, como destacaron Santika *et al.* (2019, 2020), muchas de las implicaciones de la producción de aceite de palma en el bienestar general de las comunidades locales suelen diferir según las características específicas de la ubicación de las poblaciones, la situación socioeconómica inicial y los diferentes sistemas de subsistencia de las comunidades.

En general, un aspecto importante que surge del análisis es que el logro de algunos ODS a menudo

se ve facilitado por la implementación de prácticas sostenibles de producción de aceite de palma. Esto se aplica en particular al aumento de la educación de calidad (ODS 4), una mejor salud y bienestar (ODS 3) y el acceso al agua limpia y al saneamiento (ODS 6), que a menudo se denominan cobeneficios del cultivo sostenible de plantaciones de palma de aceite. Por lo tanto, se puede concluir que la aplicación de esquemas de certificación de sostenibilidad tiene un papel clave en la mejora del desempeño socioeconómico y ambiental de la producción de aceite de palma. Como destacaron Meijaard y Sheil (2019) y Yap *et al.* (2021), la certificación de la producción sostenible de aceite de palma, si es creíble, accesible y se aplica con un enfoque transparente, puede reducir la presión ambiental, aumentar el empleo y mejorar los medios económicos de vida de las personas que viven en las zonas de producción en términos de condiciones de trabajo, infraestructura, servicios y salarios más altos, con la consiguiente reducción de las tasas de pobreza, un aumento de la educación de calidad y un mejor acceso a los sistemas de alimentación y salud.

Declaración de disponibilidad de datos

No se crearon ni analizaron nuevos datos en este estudio.

ORCID iDs

Maria Vincenza Chiriaco <https://orcid.org/0000-0002-9662-914X>

Lucia Perugini <https://orcid.org/0000-0001-7539-9528>

Referencias

- Abram N K, Meijaard E, Wilson K A, Davis J T, Wells J A, Ancrenaz M & Mengersen K 2017 Oil palm–community conflict mapping in Indonesia: a case for better community liaison in planning for development initiatives *Appl. Geogr.* 78 33-44.
- Acosta P & Curt M D 2019 Understanding the expansion of oil palm cultivation: a case-study in Papua *J. Clean. Prod.* 219 199-216.

- Adebo G M, Ayodele O J & Olowokere K 2015 Palm oil production as a poverty alleviation strategy among small-scale farmers in Ekiti State, Nigeria *World J. Agric. Res.* 3 43-48.
- Adesiji G B, Komolafe S E, Kayode A O & Paul A B 2016 Socio-economic benefits of oil palm value chain enterprises in rural areas of Kogi State Nigeria *Prod. Agri. Technol.* 12 36-47.
- Adiprasetyo T, Irnad I & Nusril N 2019 Perceived environment-economic benefits and factors influencing the adoption of Indonesian sustainable palm oil production system by smallholder farmers *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 347 012098
- Ahmed A, Dompheh E & Gasparatos A 2019 Human wellbeing outcomes of involvement in industrial crop production: evidence from sugarcane, oil palm and Jatropha Sites in Ghana *PLoS One* 14 e0215433
- Alam A F, Er A C & Begum H 2015 Malaysian oil palm industry: prospect and problem *J. Food Agric. Environ.* 13 143-8
- Alwarritzi W, Nanseki T & Chomei Y 2015 Impact of oil palm expansion on farmers' crop income and poverty reduction in Indonesia: an application of propensity score matching *J. Agric. Sci.* 8 119.
- Ayawari D T, Nwankwo N T O, Ugwumba C O A & Ugbaja M O 2018 Palm oil marketing as veritable enterprise for poverty reduction and women empowerment in South South States of Nigeria *Int. J. Multidiscip. Res. Anal.* 1 23-39.
- Ayinde O E, Muchie M, Adenuga A H, Jesudun M O, Olagunju F I y Adewumi M O 2012 Food security and emerging innovations in oil palm production in Osun state, Nigeria *Pak. J. Nutrition* 11 1009-13.
- Ayodele T 2010 *African case study: Palm oil and Economic development in Nigeria and Ghana; recommendations for the World Bank's 2010 Palm Oil Strategy* (Lagos: Initiative for Public Policy Analysis) pp 1-13.
- Ayompe L M, Schaafsma M & Egoh B N 2020 Towards sustainable palm oil production: the positive and negative impacts on ecosystem services and human wellbeing *J. Clean. Prod.* 278 123914.
- Azhar B, Saadun N, Prideaux M & Lindenmayer D B 2017 The global palm oil sector must change to save biodiversity and improve food security in the tropics *J. Environ. Manage.* 203 457-66.
- Balde B S, Diawara M, Rossignoli C M & Gasparatos A 2019 Smallholder-based oil palm and rubber production in the forest region of Guinea: An exploratory analysis of household food security outcomes *Agriculture* 9 41.
- Bassey O I 2016 Overview of oil palm production in Nigeria: comparative social and environmental impacts-the case of EkongAnaku community in cross River State Nigeria *Inst. Soc. Sci. Erasmus Univ. Rotterdam* 15 1-10.

- Budidarsono S, Dewi S, Sofiyuddin M & Rahmanulloh A 2012 Socio-economic impact assessment of palm oil production *Technical Brief No. 27* World Agroforestry Centre.
- Budidarsono S, Susanti A & Zoomers A 2013 Oil palm plantations in Indonesia: The implications for migration, settlement/resettlement and local economic development *Biofuels-Economy, Environment and Sustainability* (London: IntechOpen) pp 173-93.
- Castellanos-Navarrete A, Tobar-Tomás W V y López-Monzón C E 2019 Development without change: oil palm labour regimes, development narratives, and disputed moral economies in Mesoamerica *J. Rural Stud.* 71 169-80.
- Comte I, Colin F, Grünberger O, Whalen J K, Widodo R H & Caliman J P 2015 Watershed-scale assessment of oil palm cultivation impact on water quality and nutrient fluxes: a case study in Sumatra (Indonesia) *Environ. Sci. Pollut. Res.* 22 7676-95.
- Corley R H V 2009 How much palm oil do we need? *Environ. Sci. Policy* 12 134-9.
- Corley R H V & Tinker P B 2016 *The Oil Palm (World Agriculture Series)* 5ta ed (Hoboken, NJ: Wiley-Blackwell).
- Cova B & D'Antone S 2016 Brand iconicity vs. anti-consumption well-being concerns: the nutella palm oil conflict *J. Consum. Aff.* 50 166-92.
- Cramb R A 2013 Palmed off: Incentive problems with joint-venture schemes for oil palm development on customary land *World Dev.* 43 84-99.
- Cramb R A & Curry G N 2012 Oil palm and rural livelihoods in the Asia-Pacific region: an overview *Asia Pac. Viewp.* 53 223-39.
- Cramb R A & McCarthy J F (ed.) 2016 *The Oil Palm Complex: Smallholders, Agribusiness and the State in Indonesia and Malaysia* (Singapur: NUS Press) ([https://doi.org/ 10.2307/j.ctv1xz0km](https://doi.org/10.2307/j.ctv1xz0km))
- Dayang Norwana A A B, Kanjappan R, Chin M, Schoneveld G C, Potter L & Andriani R 2011 The local impacts of oil palm expansion in Malaysia; an assessment based on a case study in Sabah State *Center for Int. Forestry Research (CIFOR) Working Paper* vol 78 pp 1-17 (Recuperado de www.cifor.org/publications/pdf_files/Wpapers/WP-78Andriani.pdf)
- de Jong E B, Ragas A M, Nooteboom G & Mursidi M 2015 Changing water quality in the middle Mahakam Lakes: water quality trends in a context of rapid deforestation, mining and palm oil plantation development in Indonesia's middle Mahakam Wetlands *Wetlands* 35 733-44.
- de Vos R & Delabre I 2018 Spaces for participation and resistance: gendered experiences of oil palm plantation development *Geoforum* 96 217-26.
- Dib J B, Krishna V V, Alamsyah Z & Qaim M 2018 Land-use change and livelihoods of non-farm households: the role of income from employment in oil palm and rubber in rural Indonesia *Land Use Policy* 76 828-38.

- Dradjat B 2012 Structure, roles, challenges and opportunities of the oil palm industry in Indonesia: The significance of oil palm smallholders *Oil Palm Bull.* 64 1-2 (Recuperado de <http://palmoilis.mpob.gov.my/publications/OPB/opb64-bambang.pdf>)
- DTE 2014 *Women and oil palm investment region* (Recuperado de <https://www.downtoearth-indonesia.org/story/women-and-oil-palm-investment-region>) (Consultado el 31 de mayo de 2022).
- Edwards R B 2015 Is plantation agriculture good for the poor? Evidence from Indonesia's palm oil expansion No. 2015-12.
- Edwards R B 2018 Export agriculture and regional development: evidence from Indonesia *Technical Report* (Mimeo)
- Edwards R B 2019 Spillovers from agricultural processing *Work. Pap.* (Hanover, NH: Dartmouth Coll.)
- Efendi F 2012 Health worker recruitment and deployment in remote areas of Indonesia *Rural Remote Health* 12 2008.
- Elmhirst R, Basnett B S, Siscawati M & Ekowati D 2017a Gender issues in large scale land acquisition: insights from oil palm in Indonesia (Washington, DC: Rights and Resources Initiative (RRI).
- Elmhirst R, Siscawati M, Basnett B S & Ekowati D 2017b Gender and generation in engagements with oil palm in East Kalimantan, Indonesia: insights from feminist political ecology *J. Peasant Stud.* 44 1135-57.
- Etuah S, Ohene-Yankyera K, Aidoo R, Haleegoah J, Wiggins S & Henley G 2020 Impact of oil palm-related activities on women's empowerment in Ghana *World Dev. Perspect.* 19 100225.
- FAO 2005 *Fertilizer use by crop in Indonesia* (Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura).
- FAO 2015 *Food and agriculture Organization of the United Nations FAO statistical pocketbook-world food and a griculture* (Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) p 231 (Recuperado de www.fao.org/3/a-i4691e.pdf)
- FAO, IFAD, UNICEF, WFP y WHO 2020 The state of food security and nutrition in the world 2020: transforming food systems for affordable healthy diets (Roma: FAO) (Recuperado de <https://doi.org/10.4060/ca9692en>)
- FAOSTAT 2021 Food and agriculture organization of the United Nations (FAO) *FAOSTAT Database* (Recuperado de www.fao.org/faostat/en/#data/QC)
- Feintrenie L, Chong W K & Levang P 2010 Why do farmers prefer oil palm? Lessons learnt from Bungo district, Indonesia *Small-scale For.* 9 379-96.
- Fonjong L & Gyapong A 2020 Plantations, women, and food security in Africa *World Dev.* 138 105293.

- Fonseca L M, Domingues J P & Dima A M 2020 Mapping the sustainable development goals relationships *Sustainability* 12 3359.
- Foong S Z, Goh C K, Supramaniam C V & Ng D K 2019 Input-output optimisation model for sustainable oil palm plantation development *Sustain. Prod. Consum.* 17 31-46.
- Fu, Chen J, Guo H, Hu H, Chen A & Cui J 2010 Agrobiodiversity loss and livelihood vulnerability as a consequence of converting from subsistence farming systems to commercial plantation-dominated systems in Xishuangbanna, Yunnan, China: a household level analysis *Land Degrad. Dev.* 21 274-84.
- Fuchs D, Kalfagianni A & Havinga T 2011 Actors in private food governance: the legitimacy of retail standards and multistakeholder initiatives with civil society participation *Agric. Hum. Values* 28 353-67.
- Furumo P R, Rueda X, Rodríguez J S & Ramos I K P 2020 Field evidence for positive certification outcomes on oil palm smallholder management practices in Colombia *J. Clean. Prod.* 245 118891.
- Gatto M, Wollni M, Asnawi R & Qaim M 2017 Oil palm boom, contract farming, and rural economic development: village-level evidence from Indonesia *World Dev.* 95 127-40.
- German L & Schoneveld G 2011 *Social sustainability of EU-Approved voluntary schemes for biofuels: Implications for rural livelihoods* (Situ Gede: CIFOR) p 24.
- Gilbert N 2012 Palm-oil boom raises conservation concerns *Nature* 487 14-15.
- Grepalma 2020 Contributions of Guatemala's palm oil agroindustry to the country's sustainable development p 12 (Recuperado de www.grepalma.org/wp-content/uploads/2021/06/Contributions-of-Guatemala%C2%B4s-palm-oil-agroindustry-to-the-country%C2%B4s-sustainable-development.pdf)
- Hamann S 2018 Agro-industrialisation and food security: dietary diversity and food access of workers in Cameroon's palm oil sector *Can. J. Dev. Stud.* 39 72-88.
- Harianto H 2019 Palm oil spills on the performance of non-palm plantations in Indonesia: an empirical analysis *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 336 012011.
- Hidayat N K, Offermans A & Glasbergen P 2018 Sustainable palm oil as a public responsibility? On the governance capacity of Indonesian standard for sustainable palm oil (ISPO) *Agric. Hum. Values* 35 223-42.
- Hoyle D & Levang P 2012 Oil palm development in Cameroon *An ad hoc working paper prepared by WWF, IRD and CIFOR* (<https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2012.02705.x>)
- Ibitoye O O, Akinsorotan A O, Meludu N T & Ibitoye B O 2011 Factors affecting oil palm production in Ondo State of Nigeria *J. Agric. Soc. Res.* 11.
- IFAD, W 2014 *The state of food insecurity in the world 2014 strengthening the enabling environment for food security and nutrition* (Roma: FAO) (Recuperado de <https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/a-i4030e.pdf>)

- Jelsma I, Schoneveld G C, Zoomers A & van Westen A C 2017 Unpacking Indonesia's independent oil palm smallholders: an actor-disaggregated approach to identifying environmental and social performance challenges *Land Use Policy* 69 281-97.
- Jensen H T, Keogh-Brown M R, Shankar B, Aekplakorn W, Basu S, Cuevas S & Smith R D 2019 Palm oil and dietary change: application of an integrated macroeconomic, environmental, demographic, and health modelling framework for Thailand *Food Policy* 83 92-103.
- Kamalrudin M S & Abdullah R 2014 Malaysian palm oil-moving ahead to sustainable production growth *Oil Palm Ind. Econ. J.* 14 24-33.
- Kaur A 2014 Plantation systems, labour regimes and the State in Malaysia, 1900-2012 *J. Agrar. Change* 14 190-213.
- Khatun R, Reza M I H, Moniruzzaman M & Yaakob Z 2017 Sustainable oil palm industry: the possibilities *Renew. Sustain. Energy Rev.* 76 608-19.
- Köhne M 2014 Multi-stakeholder initiative governance as assemblage: roundtable on sustainable palm oil as a political resource in land conflicts related to oil palm plantations *Agric. Hum. Values* 31 469-80.
- Kosulwat V, Rojroongwasinkul N, Boonpradern A, Viriyapanich T, Jitnarin N, Sornkaew N & Vanicchakul C 2006 *Food consumption data of Thailand (In Thai) national bureau of agricultural commodity and food standards* (Bangkok: Ministerio de Agricultura y de Cooperativas).
- Kremen C, Iles A & Bacon C 2012 Diversified farming systems: an agroecological, systems-based alternative to modern industrial agriculture *Ecol. Soc.* 17 4.
- Krishna V, Euler M, Siregar H & Qaim M 2017 Differential livelihood impacts of oil palm expansion in Indonesia *Agric. Econ.* 48 639-53.
- Kushairi A, Singh R and Ong-Abdullah M 2017 The oil palm industry in Malaysia: thriving with transformative technologies *J. Oil Palm Res.* 29 431-9.
- Lee J S H, Miteva D A, Carlson K M, Heilmayr R & Saif O 2020 Does oil palm certification create trade-offs between environment and development in Indonesia? *Environmental Res. Lett.* 15 124064.
- Lee J, García-Ulloa J & Koh L 2012 *Biofuel expansion in Southeast Asia: Biodiversity impacts and policy guidelines*.
- Li T M 2015 *Social impacts of oil palm in Indonesia: A gendered perspective from west Kalimantan* vol 124 (CIFOR).
- Li T 2018 *Evidence-based options for advancing social equity in Indonesian palm oil: Implications for research, policy and advocacy* vol 208 (CIFOR).
- Löffler H, Afiff S A, Burgers P, Govers C, Heeres H J, Karyanto O & Zwaagstra T 2014 *Agriculture beyond food: Experiences from Indonesia* (La Haya : NWO/WOTRO) p 117.

- Lord S & Clay J 2006 Environmental impacts of oil palm-practical considerations in defining sustainability for impacts on the air, land and water *Int. Planters conf. on higher productivity and efficient practices for sustainable agriculture (Putrajaya, Malaysia)* pp 26-28.
- Ludin N A, Bakri M A M, Kamaruddin N, Sopian K, Deraman M S, Hamid N H & Othman M Y 2014 Malaysian oil palm plantation sector: exploiting renewable energy toward sustainability production *J. Clean. Prod.* 65 9-15.
- Luke S H, Slade E M, Gray C L, Annammala K V, Drewer J, Williamson J & Struebig M J 2019 Riparian buffers in tropical agriculture: scientific support, effectiveness and directions for policy *J. Appl. Ecol.* 56 85-92.
- Macdonald K 2020 Private sustainability standards as tools for empowering southern pro-regulatory coalitions? Collaboration, conflict and the pursuit of sustainable palm oil *Ecol. Econ.* 167 106439.
- Majid Cooke F 2012 In the name of poverty alleviation: experiments with oil palm smallholders and customary land in Sabah, Malaysia *Asia Pac. Viewp.* 53 240-53.
- Manik Y, Leahy J & Halog A 2013 Social life cycle assessment of palm oil biodiesel: a case study in Jambi Province of Indonesia *Int. J. Life Cycle Assess.* 18 1386-92.
- McCarthy J F 2010 Processes of inclusion and adverse incorporation: oil palm and agrarian change in Sumatra, Indonesia *J. Peasant Stud.* 37 821-50.
- McCarthy J F & Cramb R A 2009 Policy narratives, landholder engagement, and oil palm expansion on the Malaysian and Indonesian frontiers *Geogr. J.* 175 112-23.
- McInnes A 2017 A comparison of leading palm oil certification standards *Forest Peoples Programme* (Recuperado de www.forestpeoples.org/sites/default/files/documents/Palm%20Oil%20Certification%20Standards_lowres_spreads.pdf)
- Meijaard E, Brooks T M, Carlson K M, Slade E M, García-Ulloa J, Gaveau D L & Sheil D 2020 The environmental impacts of palm oil in context *Nat. Plants* 6 1418-26.
- Meijaard E & Sheil D 2019 The moral minefield of ethical oil palm and sustainable development *Front. For. Glob. Change* 2 22.
- Mingorría S, Gamboa G, Martín-López B & Corbera E 2014 The oil palm boom: socio-economic implications for Q'eqchi' households in the polochic valley Guatemala *Environ. Dev. Sustain.* 16 841-71.
- Moreno-Peñaranda R, Gasparatos A, Stromberg P, Suwa A, Pandiyaswargo A H & de Oliveira J A P 2015 Sustainable production and consumption of palm oil in Indonesia: what can stakeholder perceptions offer to the debate? *Sustain. Prod. Consum.* 4 16-35.
- Morgans C L, Meijaard E, Santika T, Law E, Budiharta S, Ancrenaz M & Wilson K A 2018 Evaluating the effectiveness of palm oil certification in delivering multiple sustainability objectives *Environ. Res. Lett.* 13 064032.

- Muhammad K I, Sharaai A H, Ismail M M, Harun R & Yien W S 2019 Social implications of palm oil production through social life cycle perspectives in Johor, Malaysia *Int. J. Life Cycle Assess.* 24 935-44.
- Muyibi S A, Ambali A R & Eissa G S 2008 Development-induced water pollution in Malaysia: policy implications from an econometric analysis *Water Policy* 10 193-206.
- Nambiappan B, Ismail A, Hashim N, Ismail N, Nazrima S, Idris N A N & Kushairi A 2018 Malaysia: 100 years of resilient palm oil economic performance *J. Oil Palm Res.* 30 13-25.
- Niaz M U 2021 Socio-economic development and sustainable development goals: a roadmap from vulnerability to sustainability through financial inclusion *Econ. Res.* 1-33.
- Nkongho R N, Feintrenie L & Levang P 2014 Strengths and weaknesses of the smallholder oil palm sector in Cameroon *OCL* 21 D208.
- Obidzinski K, Andriani R, Komarudin H & Andrianto A 2012 Environmental and social impacts of oil palm plantations and their implications for biofuel production in Indonesia *Ecol. Soc.* 17.
- Obire O & Putheti R R 2010 The oil palm tree: a renewable energy in poverty eradication in developing countries *Drug Invent. Today* 2 (Recuperado de <http://ditonline.info/index.php/ditonline/article/viewArticle/1433>)
- Ofosu-Budu K & Sarpong D 2013 Oil palm industry growth in Africa: a value chain and smallholders study for Ghana *Rebuilding West Africa's Food Potential* ed A Elbehri (FAO/IFAD) p 42.
- Ohimain E I, Emeti C I & Izah S C 2014 Employment and socioeconomic effects of semi-mechanized palm oil mill in Bayelsa State, Nigeria *Asian J. Agric. Extension Econ. Sociol.* 3 206-16.
- Omonona B T & Agboje I A 2013 Growth in oil palm value chain under micro enterprises in delta state, Nigeria *Int. J. Res. Manage. Econ. Commerce* 3.
- Onoja A O, Achike A I & Ajibade T B 2017 Econometric analysis of short-run and long-run determinants of agricultural value addition in Africa *Agrosearch* 17 26-43.
- Oosterveer P 2014 Promoting sustainable palm oil: viewed from a global networks and flows perspective *J. Clean. Prod.* 107 146-53.
- Osei-Amponsah C, Visser L, Adjei-Nsiah S, Struik P C, Sakyi-Dawson O & Stomph T J 2012 Processing practices of small-scale palm oil producers in the Kwaebibirem District, Ghana: a diagnostic study *NJAS-Wagening. J. Life Sci.* 60 49-56.
- Otieno N E, Dai X, De Barba D, Bahman A, Smedbol E, Rajeb M & Jatón L 2016 Palm oil production in Malaysia: an analytical systems model for balancing economic prosperity, forest conservation and social welfare *Agric. Sci.* 7 55-69.

- Pacheco P, Gnych S, Dermawan A, Komarudin H & Okarda B 2017 *The palm oil global value chain: Implications for economic growth and social and environmental sustainability* (Center for International Forestry Research (CIFOR)) (<https://doi.org/10.17528/cifor/006405>)
- Papilo P, Hambali E & Sitanggang I S 2018 Sustainability index assessment of palm oil-based bioenergy in Indonesia *J. Clean. Prod.* 196 808-20.
- Persey S, Nussbaum R, Hatchwell M, Christie S & Crowley H 2011 Towards sustainable palm oil: a framework for action No. 113598 (The World Bank) pp 1-21.
- Pesqueira L & Glasbergen P 2013 Playing the politics of scale: Oxfam's intervention in the Roundtable on Sustainable Palm Oil *Geoforum* 45 296-304.
- Pirker J, Mosnier A, Kraxner F, Havlík P & Obersteiner M 2016 What are the limits to oil palm expansion? *Global Environ. Change* 40 73-81.
- Potter L 2015 *Managing oil palm landscapes: A seven-country survey of the modern palm oil industry in Southeast Asia, Latin America and West Africa* vol 122 (CIFOR).
- Purnomo H, Okarda B, Dermawan A, Ilham Q P, Pacheco P, Nurfatriani F & Suhendang E 2020 Reconciling oil palm economic development and environmental conservation in Indonesia: a value chain dynamic approach *For. Policy Econ.* 111 102089.
- Purnomo H, Okarda B, Dewayani A A, Ali M, Achdiawan R, Kartodihardjo H & Juniawaty K S 2018 Reducing forest and land fires through good palm oil value chain governance *For. Policy Econ.* 91 94-106.
- Pye O 2019 Commodifying sustainability: Development, nature and politics in the palm oil industry *World Dev.* 121 218-28.
- Pye O, Daud R & Harmono Y 2012 Precarious lives: transnational biographies of migrant oil palm workers *Asia Pac. Viewp.* 53 330-42.
- Qaim M, Sibhatu K T, Siregar H & Grass I 2020 Environmental, economic, and social consequences of the oil palm boom *Ann. Rev. Resour. Econ.* 12 321-44.
- Rewtarkulpaiboon L 2015 Thai palm oil industry and roadmap for implementation of strategic agricultural crops *Electronic Slides from Asia Palm Oil Conf. Presentation: Office of Agricultural Economics, Ministry of Agriculture and Cooperatives.*
- Rist L, Feintrenie L & Levang P 2010 The livelihood impacts of oil palm: smallholders in Indonesia *Biodivers. Conserv.* 19 1009-24 RSPO 2021 Impact (Recuperado de <https://rspo.org/impact>)
- Rueda-Zárate A & Pacheco P 2015 *Políticas, mercados y modelos de producción: un análisis de la situación y desafíos del sector palmero colombiano* vol 128 (CIFOR).

- Ruggeri A & Samoggia A 2018 Twitter communication of agri-food chain actors on palm oil environmental, socio-economic, and health sustainability *J. Consum. Behav.* 17 75-93.
- Santika T, Wilson K A, Budiharta S, Law E A, Poh T M, Ancrenaz M & Meijaard E 2019 Does oil palm agriculture help alleviate poverty? A multidimensional counterfactual assessment of oil palm development in Indonesia *World Dev.* 120 105-17.
- Santika T, Wilson K A, Law E A, St John F A, Carlson K, Gibbs H & Struebig M J 2020 Impact of palm oil sustainability certification on village well-being and poverty in Indonesia *Nat. Sustain.*
- Schlösser A & Walter C 2020 Benchmarking study on sustainability standards for the palm oil sector.
- Schrier-Uijl A P, Silvius M, Parish F, Lim K H, Rosediana S & Anshari G 2013 *Environmental and social impacts of oil palm cultivation on tropical peat: A scientific review* (Kuala Lumpur: Roundtable of Sustainable Palm Oil) pp 131-68.
- Sharma S K, Baral H, Laumonier Y, Okarda B, Komarudin H, Purnomo H & Pacheco P 2019 Ecosystem services under future oil palm expansion scenarios in West Kalimantan, Indonesia *Ecosyst. Serv.* 39 100978.
- Sheil D, Casson A, Meijaard E, Van Noordwijk M, Gaskell J, Sunderland-Groves J & Kanninen M 2009 *The impacts and opportunities of oil palm in Southeast Asia: What do we know and What do we need to know?* vol 51 (Bogor: Center for International Forestry Research).
- Shimizu H & Desrochers P 2012 The health, environmental and economic benefits of palm oil *IEM's Economic Note* pp 1-4.
- Sibhatu K T 2019 Oil palm boom and farm household diets in the tropics *Front. Sustain. Food Syst.* 3 75.
- Sibhatu K T & Qaim M 2018 Farm production diversity and dietary quality: linkages and measurement issues *Food Secur.* 10 47-59.
- Silalertruksa T, Gheewala S H, Hünecke K & Fritsche U R 2012 Biofuels and employment effects: implications for socio-economic development in Thailand *Biomass Bioenergy* 46 409-18.
- Silalertruksa T, Gheewala S H, Pongpat P, Kaenchan P, Permpool N, Lecksiwilai N & Mungkung R 2017 Environmental sustainability of oil palm cultivation in different regions of Thailand: greenhouse gases and water use impact *J. Clean. Prod.* 167 1009-19.
- Sinaga H 2013 Employment and income of workers on Indonesian oil palm plantations *Future Food: J. Food Agric. Soc.* 1 51-60.
- Sitepu M H, Matondang A R, Sembiring M T & Lubis W N 2020 Socio technical analysis of palm oil plantation in North Sumatera Indonesia: making sustainable supply *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 801 012115.

- Susila W R 2004 Contribution of oil palm industry to economic growth and poverty alleviation in Indonesia *J. Litbang Pertanian* 23 107-14.
- Syahza A, Saragih S, Sari M, Rofaida R & Wangsa I H S 2011 The institutional arrangements in the palm oil sector: effort to spur economic growth in rural areas (<https://doi.org/10.21632/irjbs.4.3.171-188>).
- Tata H L, Van Noordwijk M, Mulyoutami E, Rahayu S, Widayati A & Mulia R 2010 *Human livelihoods, ecosystem services and the habitat of the Sumatran orangutan: Rapid assessment in Batang Toru and Tripa* (Bogor: World Agroforestry Centre (ICRAF) Sudeste de Asia, Oficina Regional.
- Therville C, Feintrenie L & Levang P 2011 Farmers' perspectives about agroforests conversion to plantations in Sumatra Lessons learnt from Bungo district (Jambi Indonesia) *For. Trees Livelihoods* 20 15-33.
- Tirtosudarmo R 2009 Mobility and human development in Indonesia *UNDP. Human Development Research Paper* 2009/19 UN 2015 SDGs 2030
- UNICEF 2016 Palm oil and children in Indonesia: exploring the sector's impact on children's rights *UNICEF* (Jakarta) (Recuperado de www.unicef.org/indonesia/media/4391/file)
- van der Enden S 2013 *Smallholders and sustainable palm oil production: A better understanding between policy arrangements and real-life practices (A case study of the siak smallholders Site, Riau Province, Sumatra)* (Wageningen University and Research Centre).
- Varkkey H 2012 The growth and prospects for the oil palm plantation industry in Indonesia *Oil Palm Ind. Econ. J.* 12 1-13.
- White J & White B 2012 Gendered experiences of dispossession: oil palm expansion in a Dayak Hibun community in West Kalimantan *J. Peasant Stud.* 39 995-1016.
- Wu T Y, Mohammad A W, Jahim J M & Anuar N 2010 Pollution control technologies for the treatment of palm oil mill effluent (POME) through end-of-pipe processes *J. Environ. Manage.* 91 1467-90.
- Yaap B & Paoli G 2014 A comparison of leading palm oil certification standards applied in Indonesia: towards defining emerging norms of good practices (Bogor).
- Yap P, Rosdin R, Abdul-Rahman A A A, Omar A T, Mohamed M N & Rahami M S 2021 Malaysian sustainable palm oil (MSPO) certification progress for independent smallholders in Malaysia *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 736 012071.

Una década de aplicación de las herramientas de gestión del paisaje: evaluación del cambio de la cobertura del suelo utilizando imágenes basadas en UAS, un estudio de caso en una plantación de palma de aceite en Mapiripán, Meta, Colombia*

A Decade of Landscape Management Tools Implementation: Land Cover Change Assessment Using UAS Based Imagery, a Case Study in an Oil Palm Plantation in Mapiripán, Meta, Colombia

CITACIÓN: Gómez-Mateus, A. M., Majiera, A., Domptail, S., Espinosa, J. C., Gómez, G., Ruíz-Delgado, J. & Waldhardt, R. (2023). *Palmas*, 44(2), 59-79.

PALABRAS CLAVE: Evaluación de la estructura del paisaje, Cambio de uso del suelo, Herramientas de gestión del paisaje, Sistemas aéreos no tripulados.

KEYWORDS: Landscape structure assessment, Land use change, Landscape management tools, Unmanned aerial systems.

RECIBIDO: febrero de 2023

ACEPTADO: mayo de 2023

* Artículo de investigación e innovación científica y tecnológica.

GÓMEZ MATEUS, ADRIANA MARCELA
Instituto de Política Agrícola
e Investigación de Mercado, Universidad
Justus Liebig
Autor para correspondencia:
adriana.gomezmateus@gmail.com

MAGIERA, ANJA
Centro de Ciencias Ambientales
e Investigación Internacional (ZEU),
Universidad Justus Liebig

DOMPTAIL STEPHANIE
Instituto de Política Agrícola
e Investigación de Mercado, Universidad
Justus Liebig

ESPINOSA, JUAN CARLOS
Consultor Independiente en Gestión
Ambiental Corporativa

GÓMEZ, GUSTAVO
Proforest

RUÍZ-DELGADO, JONATHAN
Federación Nacional de Cultivadores
de Palma de Aceite (Fedepalma)

WALDHARDT, RAINER
Centro de Ciencias Ambientales
e Investigación Internacional (ZEU)
e Instituto de Ecología del Paisaje y Gestión
de Recursos. Universidad Justus Liebig

Resumen

En Colombia, la palma de aceite es un sector económico agroindustrial importante. Uno de sus principales retos es garantizar simultáneamente el crecimiento de la producción de aceite de palma y mantener y mejorar el medio ambiente local, así como un paisaje agrícola sosten-

nible. Por lo tanto, se hizo un análisis del paisaje en una plantación de palma de aceite ejemplar para evaluar la estructura y la complejidad del mismo, y el cambio de uso de la tierra entre 2009 y 2019. El estudio de caso se realizó en la plantación de aceite de palma Poligrow, en el predio Macondo, ubicado en Mapiripán, Meta, zona Oriental de Colombia, con un área total de 5.853 hectáreas. El estudio del paisaje se basó en un análisis SIG de los mapas de cobertura del suelo de 2009. En primer lugar, el mapa de cobertura del suelo de la plantación se dividió en una cuadrícula con celdas de 500 x 500 metros. En segundo lugar, se aplicaron las métricas del paisaje para la evaluación de la estructura de este y se calculó un análisis de conglomerados de *k-means*. Las celdas se agruparon en 9 grupos de similitud basados en las métricas del paisaje. Se seleccionaron 4 celdas por grupo, con un total de 36, como muestra de la plantación. Para cada celda seleccionada se tomaron fotografías aéreas a una altura de 100 metros, para crear las ortofotos. Dichas imágenes se tomaron utilizando sistemas aéreos no tripulados, en este caso (UAS por sus siglas en inglés), un dron DJI, que permitieron tomar más de 10.800 fotografías aéreas en 10 días. Esta herramienta proporcionó información detallada y actualizada sobre la cobertura del suelo y los cambios en su uso, lo que resultó esencial para el seguimiento y la toma de decisiones. Este tipo de análisis del paisaje permite a los gestores de las plantaciones de palma de aceite supervisar el cambio de la cobertura del suelo y las herramientas de gestión del paisaje (HGP) aplicadas dentro de la plantación.

Abstract

In Colombia, oil palm is an important economic sector of the agroindustry. One of its main challenges is to simultaneously ensure palm oil production growth and maintain and improve the local environment and a sustainable agricultural landscape. Thus, we conducted a landscape analysis on an exemplary palm oil plantation to assess the landscape structure and complexity, and land-use change between 2009 and 2019. The case study is done in the Macondo oil palm plantation, located in Mapiripán, Meta, in the eastern zone of Colombia with a total area of 5,853 hectares. The landscape analysis is based on a 2009 land cover maps GIS analysis. First, the land cover map of the plantation was divided into grid cells of 500 by 500 meters. Second, we applied landscape metrics for the landscape structure assessment and calculated a k-means cluster analysis. The grid cells were clustered into nine (9) similarity groups based on landscape metrics. Four (4) squares per group, in a total of 36, were selected as a sample of the plantation. For each selected square, we took aerial photography at a height of 100 meters to create the orthophotos. The aerial photographs were taken using Unmanned Aerial Systems (UAS), in this case, a DJI drone, and enabled us to take over 10,800 aerial photographs in 10 days. Aerial photography provides detailed and up-to-date information on land cover and land use change, which is essential for monitoring and decision-making. This type of landscape analysis enables managers of oil palm plantations to monitor land cover change and the implemented Landscape Management Tools (LMT) within the plantation.



Introducción

La palma de aceite (*Elaeis guineensis*) es originaria de África occidental, donde se ha utilizado como alimento, medicina y fuente de aceite para cocinar (Mba *et al.*, 2015). En los últimos 70 años, el aceite de palma se ha convertido en un ingrediente clave de una gran variedad de productos comunes que se usan a diario (Qaim *et al.*, 2021). Su producción da el mayor rendimiento por hectárea frente a los demás

aceites vegetales y tiene bajos costos de producción (Mba *et al.*, 2015). Por esta razón, el aceite de palma es competitivo y rentable entre los demás aceites vegetales (Oosterveer, 2015). En la actualidad, se está expandiendo rápidamente como un producto agrícola en las regiones tropicales (Gray *et al.*, 2014) para satisfacer la demanda mundial de aceite para cocinar, alimentos, cosméticos, la industria oleoquímica y la generación de energía (Khatun *et al.*, 2017; Oosterveer, 2015). Los cultivos de palma de aceite suelen

ser monocultivos asociados con la deforestación y la pérdida de biodiversidad, por ejemplo, en las grandes plantaciones de palma de aceite de Indonesia y Malasia (International Union for Conservation of Nature (IUCN), 2018; Meijaard *et al.*, 2018; Qaim *et al.*, 2021). Sin embargo, se ha argumentado que pueden mejorar la biodiversidad con una gestión adecuada del paisaje (Teuscher *et al.*, 2015) y fomentar el desarrollo económico y social en las zonas rurales (Boons y Mendoza, 2010). Las estrategias de manejo del suelo incluyen la producción agrícola y la conservación de la biodiversidad simultáneamente (e.d *land sparing and land sharing*). El *land sparing* o compartir la tierra significa usarla de forma intensiva y dejar algunas áreas para la conservación (Green *et al.*, 2005). El *land sharing* significa compartir la tierra entre las áreas para la conservación y la tierra para la producción (Perfecto y Vandermeer, 2012). También existe la posibilidad de integrar ambos enfoques para proporcionar un lugar para la biodiversidad y, al mismo tiempo, tener áreas agrícolas altamente productivas (p. ej., Egan y Mortensen, 2012).

En Colombia, las plantaciones de palma se han expandido rápidamente para satisfacer las demandas de aceite nacionales e internacionales, según el Departamento Nacional de Planeación (Conpes 3510, 2008). Actualmente es el primer país productor de aceite de palma en América Latina y el cuarto a nivel mundial (Girón-Amaya *et al.*, 2022). Así, se espera la expansión de la palma de aceite en los próximos años, especialmente en la zona oriental del país (DNP, 2019) de acuerdo con la definición oficial de la frontera agrícola (Unidad de Planificación Rural (UPRA), 2018). Esta expansión debe prever las características del paisaje local para mantener la biodiversidad y tener áreas de producción sostenibles (Ocampo-Penuela *et al.*, 2018).

En el contexto de Colombia, las plantaciones actuales y nuevas de palma de aceite podrían implementar herramientas de gestión del paisaje (HGP) para evitar impactos adversos, promover la conservación de la biodiversidad y generar servicios ecosistémicos (Lozano-Zambrano, 2009), como el control de plagas y enfermedades, la formación del suelo y la polinización. Las herramientas de gestión del paisaje son estrategias de conservación para hacer cambios físicos en el paisaje agrícola (p. ej. siembra de palma de aceite) y para promover la estabilidad de la biodiversidad, la conectividad del paisaje y la conservación dentro de los paisajes agrícolas (Lozano-Zambrano, 2009). Los cambios físicos en el paisaje consisten en una heterogeneidad composicional y configuracional que tiene en cuenta los tipos de vegetación y los elementos del paisaje (matriz, parche, corredor) (Fahrig *et al.*, 2011). La implementación de HGP en las plantaciones de palma de aceite puede generar beneficios y servicios ecosistémicos, tales como la filtración de agua, la mejora de la estructura del suelo, control de la erosión y el movimiento de especies (Lozano-Zambrano, 2009).

La teledetección es crucial para el monitoreo ambiental y la evaluación del cambio de la cobertura del suelo (Bryson *et al.*, 2019; Morgan, 2010). El cambio de la cobertura del suelo en el mundo es de especial importancia, dado que casi 30 % de la tierra utilizada para la expansión agrícola se ha obtenido a expensas de bosques tropicales ricos en especies y carbono (Vijay *et al.*, 2016). Por lo tanto, el monitoreo de paisajes utilizando sistemas aéreos no tripulados (UAS por sus siglas en inglés) ayuda a detectar cambios en un área determinada con una alta resolución que respalda la gestión de tierras y granjas (Morgan, 2010). Las técnicas de teledetección combinadas con la fotografía aérea recopilada por los UAS proporcionan in-



Cerca de tres cuartas partes de la inversión con recursos del **Fondo de Fomento Palmero**

se destina a temas de ciencia, tecnología e innovación, a través de los programas, para mejorar el estatus fitosanitario y para incrementar la productividad y optimizar costos de producción.

formación esencial detallada sobre la cubierta terrestre y el cambio de uso de la tierra (Thomson *et al.*, 2007) que se puede utilizar para la planificación espacial y el uso de la tierra, así como para la gestión de los recursos naturales (Caccetta *et al.*, 2016).

Recientemente se ha utilizado la fotografía aérea para muchas aplicaciones que van desde la evaluación del impacto ambiental hasta el monitoreo de vertederos, la concesión de permisos y la aplicación de la ley, la mitigación de desastres naturales (Lillesand *et al.*, 2015) y la gestión de plantaciones (Montes de Oca *et al.*, 2018). Especialmente, la nueva estructura de la técnica de movimiento permite construir modelos digitales de elevación (MDE) a partir de imágenes adquiridas desde diferentes ángulos y posiciones de vuelo y la generación de ortofotografías (Gong *et al.*, 1999). Las mediciones de área usando las ortofotografías son más precisas porque tienen una escala constante y están libres del desplazamiento causado por diferencias de elevación (Gong *et al.*, 1999). La fotografía aérea ofrece gran cantidad de detalles en la ortofotografía y es un método rentable y rápido para crear mapas de alta resolución de grandes áreas (Bryson *et al.*, 2019; Paine y Kiser, 2003). Las fotografías aéreas son útiles para analizar el paisaje y monitorear el cambio de la cubierta del suelo, especialmente para evaluaciones de pequeña escala (por ejemplo, plantación de palma de aceite) que requieren características finas (Morgan, 2010).

Para el presente estudio se utilizó la fotografía aérea como herramienta para analizar los cambios en la cubierta del suelo en la plantación Poligrow, en el predio Macondo en Mapiripán, Meta, Colombia. Debido a las limitaciones de tiempo y recursos, se eligió esta herramienta porque es fácil de usar, de bajo costo y alta resolución (Paine y Kiser, 2003; Stöcker *et al.*, 2017). La plantación Poligrow fue elegida como un caso de estudio debido a su paisaje agrícola particular y su diseño que integra ecosistemas naturales (e.d. sabanas naturales, bosques en galería y ribera) y palmas de aceite. Por ejemplo, más de 30 % del área corresponde a ecosistemas locales como bosques en galería y sabanas naturales. Hasta ahora no se ha evaluado la estructura del paisaje para la cobertura del suelo y el monitoreo de las plantaciones. Sin embargo, los administradores de la plantación realizaron controles regulares en el terreno y reco-

pilaron datos. El análisis destacó que los ecosistemas naturales están aumentando debido a la implementación de HGP. Estos resultados muestran que las plantaciones de palma de aceite pueden contribuir a la biodiversidad y la conservación de los ecosistemas. La principal pregunta de investigación es, ¿qué propiedades estructurales del paisaje caracterizan el paisaje de la plantación de palma de aceite mejorada por la naturaleza, en un rango de diez años, en Mapiripán, Meta, Colombia?

Estado del arte

La implementación de las HGP promueve la integración de ecosistemas naturales dentro de las plantaciones de palma de aceite.

Algunas investigaciones anteriores han establecido que la integración de la naturaleza con la palma de aceite puede proporcionar varios servicios ecosistémicos, como el control de plagas (Koh, 2008a) y la polinización (Gray *et al.*, 2016), que son importantes para los sistemas agrícolas (Howe *et al.*, 2014). Del mismo modo, la integración de la naturaleza en paisajes agrícolas mejora la conectividad (Gray *et al.*, 2016), la complejidad estructural y la riqueza de especies (Lucey *et al.*, 2014; Najera y Simonetti, 2010) y aumenta la biodiversidad (Schroth *et al.*, 2004) y la heterogeneidad del hábitat (p. ej., estructuras de vegetación más variables) (Azhar *et al.*, 2013). Por ejemplo, la heterogeneidad del hábitat a nivel local y paisajístico puede mitigar la pérdida de diversidad de aves, mejorando y manteniendo sus poblaciones (Azhar *et al.*, 2011; Najera y Simonetti, 2010; Teuscher *et al.*, 2015).

La estructura del paisaje tiene consecuencias importantes para los servicios de regulación de plagas proporcionados por muchas especies con requisitos específicos de hábitat (Maas *et al.*, 2018). Del mismo modo, la complejidad del paisaje con hábitats heterogéneos aumenta la diversidad de los depredadores naturales y, al mismo tiempo, puede mejorar los servicios de regulación de plagas (Bianchi *et al.*, 2006). Nurdiansyah *et al.* (2016) mostraron que la aparición de depredadores de plagas (es decir, hormigas, aves, monos y murciélagos) se ve afectada por la vegetación que rodea las plantaciones de palma de aceite. El aumento de la complejidad estruc-

tural dentro de las plantaciones (es decir, el helecho de tierra y epífita) proporciona sitios de anidación para las aves insectívoras, que pueden controlar a los que se alimentan de hojas (Koh, 2008a; Koh 2008b). Al mismo tiempo, los bosques en los sistemas agrícolas promueven poblaciones de potenciales depredadores y polinizadores como aves, murciélagos e insectos (Maas *et al.*, 2018). En última instancia, la polinización y el control de plagas pueden producir un efecto indirecto en el rendimiento de los cultivos (e.d un aumento en estos) (Maas *et al.*, 2018; Tschardt *et al.*, 2007).

Varios estudios han examinado cómo la fauna utiliza las plantaciones de aceite de palma como corredores, hábitats, fuentes de alimentos y proveedores de refugio (p. ej. González-Olarte y Fadul-Escovar, 2014; Gray *et al.*, 2014; Pardo *et al.*, 2019; Torres, 2010). Un sistema agrícola ecológicamente diverso puede apoyar el movimiento de la vida silvestre sin afectar la producción agrícola (Höbinger *et al.*, 2012; Miccolis *et al.*, 2014).

En el área de estudio: Mapiripán, Meta, Colombia, la presencia de un león de montaña (*Puma concolor*) se atribuyó a las prácticas de manejo para plantaciones sostenibles de palma de aceite, siendo el primer registro de un evento de depredación en un cultivo en la región (González-Olarte y Fadul-Escovar, 2014). En la misma línea, Pardo-Vargas y Payán-Garrido (2015) mostraron que las especies encontradas en las plantaciones de palma de aceite eran similares a las típicas del ecosistema de la sabana (dominado por vegetación herbácea continua).

Implementación de las herramientas de gestión del paisaje en la plantación Poligrow

La Figura 1 muestra ejemplos de las HGP implementadas en la plantación Poligrow, en el predio Macondo. Estas incluyen áreas de amortiguación, cercas vivas, cobertura del suelo, aplicación de compost, plantas nectaríferas y mantenimiento de bosques. Las áreas de amortiguamiento, con áreas abiertas con poca vegetación, controlan la posible contaminación del cultivo (Borin *et al.*, 2010). Las cercas vivas plantadas con especies nativas y exóticas separan las palmas de aceite de los ecosistemas

naturales. Estas pueden controlar la contaminación y actuar como un sumidero de carbono (Borin *et al.*, 2010). La aplicación de cobertura del suelo y compost agrega material orgánico y fija el nitrógeno al suelo, evita la pérdida de nutrientes y promueve la formación del suelo (Cenipalma *et al.*, 2017). Las plantas nectaríferas generalmente se siembran a lo largo de la carretera, la *Urena lobata* y *Senna reticulata* albergan varios tipos de insectos y arácnidos que controlan las poblaciones de plagas (Cenipalma *et al.*, 2017). El mantenimiento de los bosques y los ecosistemas naturales son importantes para albergar flora y fauna nativas que a su vez proporcionan otros servicios ecosistémicos (p. ej. Nurdiansyah *et al.*, 2016).

Los ecosistemas naturales están integrados dentro del diseño de la plantación, además, es posible observar que estos se extienden alrededor de la misma (Figura 2). Hay que tener en cuenta que la forma de las áreas de palma de aceite no es simétrica y sigue la forma de los ecosistemas naturales, por ejemplo, los bosques en galería y los humedales (Figura 3). La distribución de los ecosistemas locales promueve la dispersión de los servicios ecosistémicos en toda la plantación y proporciona hábitat y fuentes de alimentos para la fauna local (Bianchi *et al.*, 2006; Pardo-Vargas y Payán-Garrido, 2015). En las Figuras 2 y 3 es posible observar cómo en el predio Macondo se han implementado las HGP. Al ponerlo en práctica, la plantación está cumpliendo con los requisitos de los sistemas de certificación y aprovechando los beneficios ecológicos, por ejemplo, el control de plagas.

Materiales y métodos

Área de estudio

El presente estudio de caso se desarrolla en la plantación Poligrow en el predio Macondo (5.853 ha). Esta se encuentra situada en la sabana de las tierras bajas orientales de Colombia, en Mapiripán, Meta, a altitudes de entre 163 y 226 m s. n. m. (Figura 4).

La plantación Poligrow, en el predio Macondo, consiste en palma de aceite y hábitats naturales típicos de la vegetación de las tierras bajas del este, como bosques en galería asociados con los cuerpos de agua cercanos, vegetación secundaria o de transición y

Figura 1. Ejemplos de estrategias de herramientas de gestión del paisaje: a. áreas de amortiguamiento entre hábitats naturales y palma de aceite; b. cercas vivas; c. y d. cobertura del suelo; e. aplicación de compost; f. planta nectarífera (*Senna reticulata*); g. planta nectarífera (*Urena lobata*); h) bosques. Fuente: foto 1: Santiago Chiquito (2019); fotos a, b, c, d, e, f, g, h: Adriana M. Gómez M. (2019)



Figura 2. Ecosistemas naturales dentro de los cultivos de palma de aceite en la plantación Poligrow en el predio Macondo

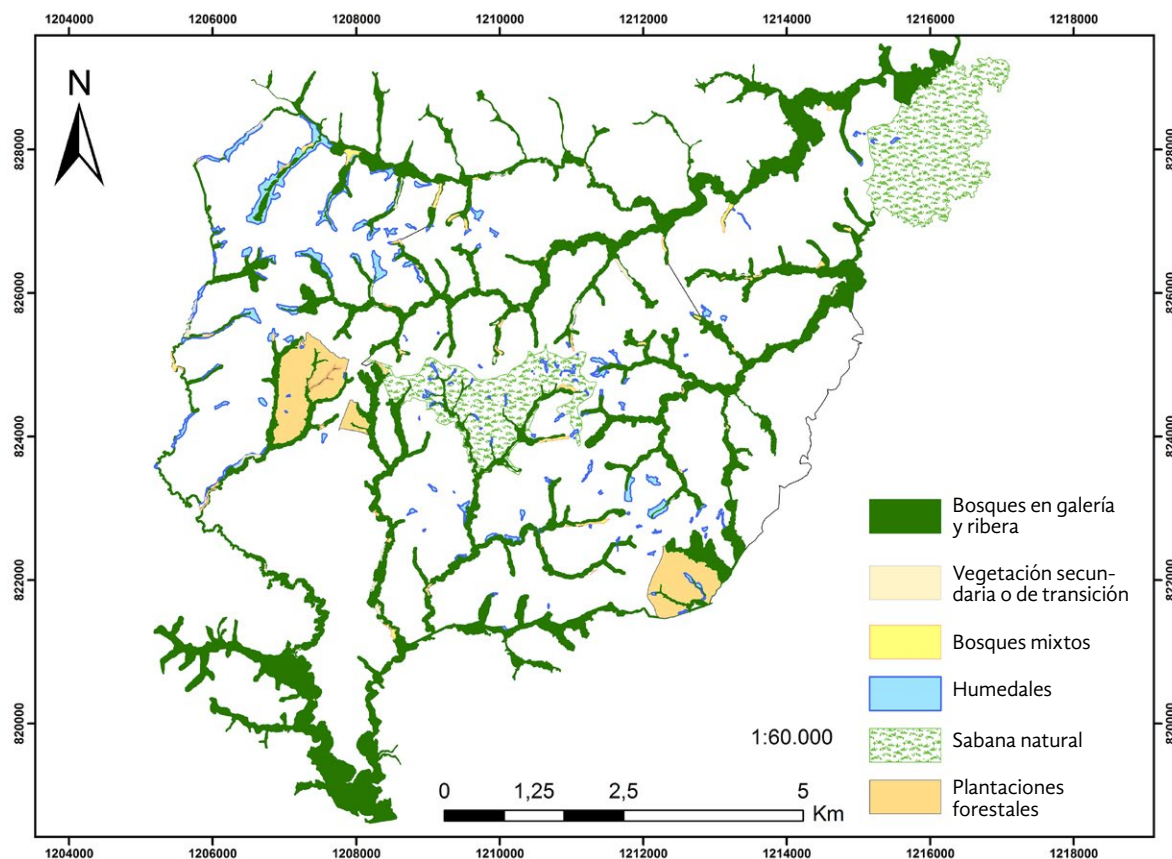


Figura 3. Ejemplos de la forma de los lotes dentro de la plantación Poligrow en el predio Macondo. Foto: Santiago Chiquito (2019)



sabanas naturales (Rodríguez, 2010). El área donde se encuentra la plantación ha sufrido varios cambios de uso y cobertura del suelo, desde la producción de cultivos y ganado hasta la palma de aceite en la actualidad (Mejía-Buitrago, 2016). Las coberturas de tierra presentes en la plantación consisten en cultivos de palma de aceite (plantados en 2009, 2010, 2011 y 2012), bosques mixtos, bosques en galería y ribera, producción de madera, vegetación secundaria o de transición, cuerpos de agua, pastizales naturales, espacios abiertos con poca o ninguna vegetación y áreas industriales (Figura 5).

Compilación de los mapas de cobertura del suelo 2009 y 2019

El mapa de la cobertura del suelo del archivo inicial de ArcGIS 2009 entregado por la plantación Poligrow representa el material de planificación oficial del estado del arte en 2009. Este se realizó utilizando ArcGIS conforme la metodología CORINE de cobertura del suelo (Ardila y García, 2010) para utilizar una nomenclatura estandarizada.

El mapa de la cobertura del suelo presenta todos los tipos de vegetación en el área de estudio: plantaciones

Figura 4. Área de estudio que muestra el municipio de Mapiripán en la zona este de Colombia.

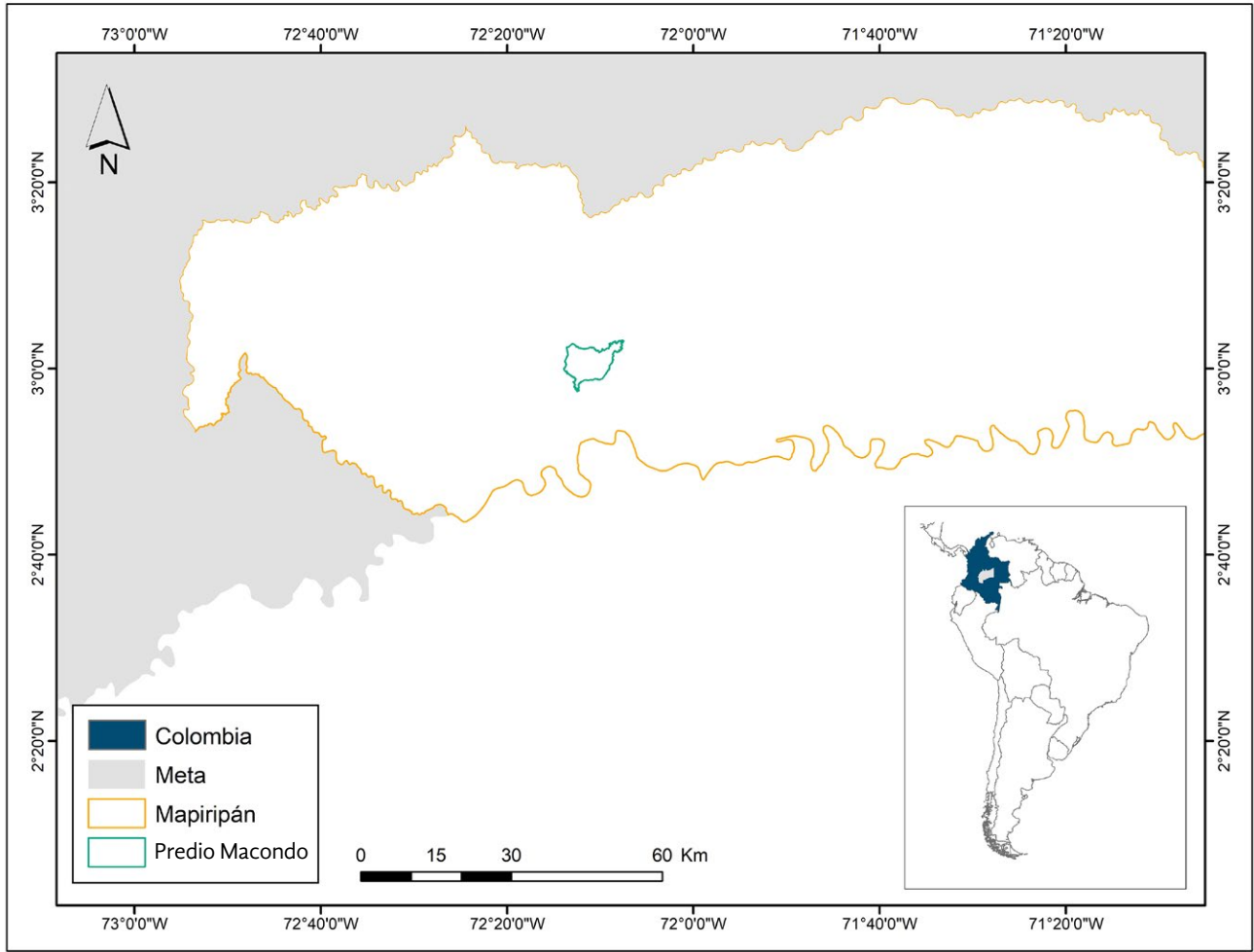
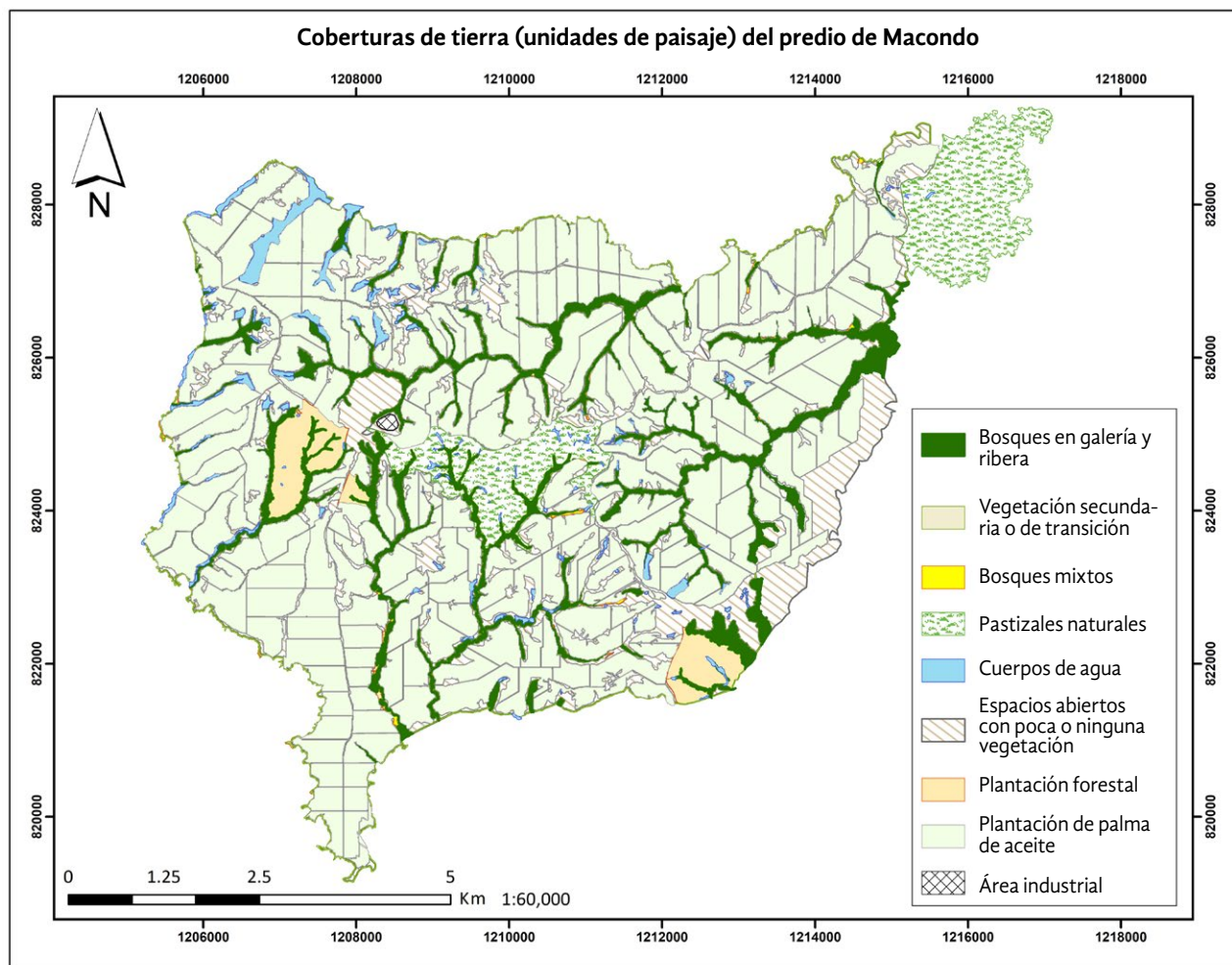


Figura 5. Mapa del predio Macondo que muestra las diferentes coberturas del suelo



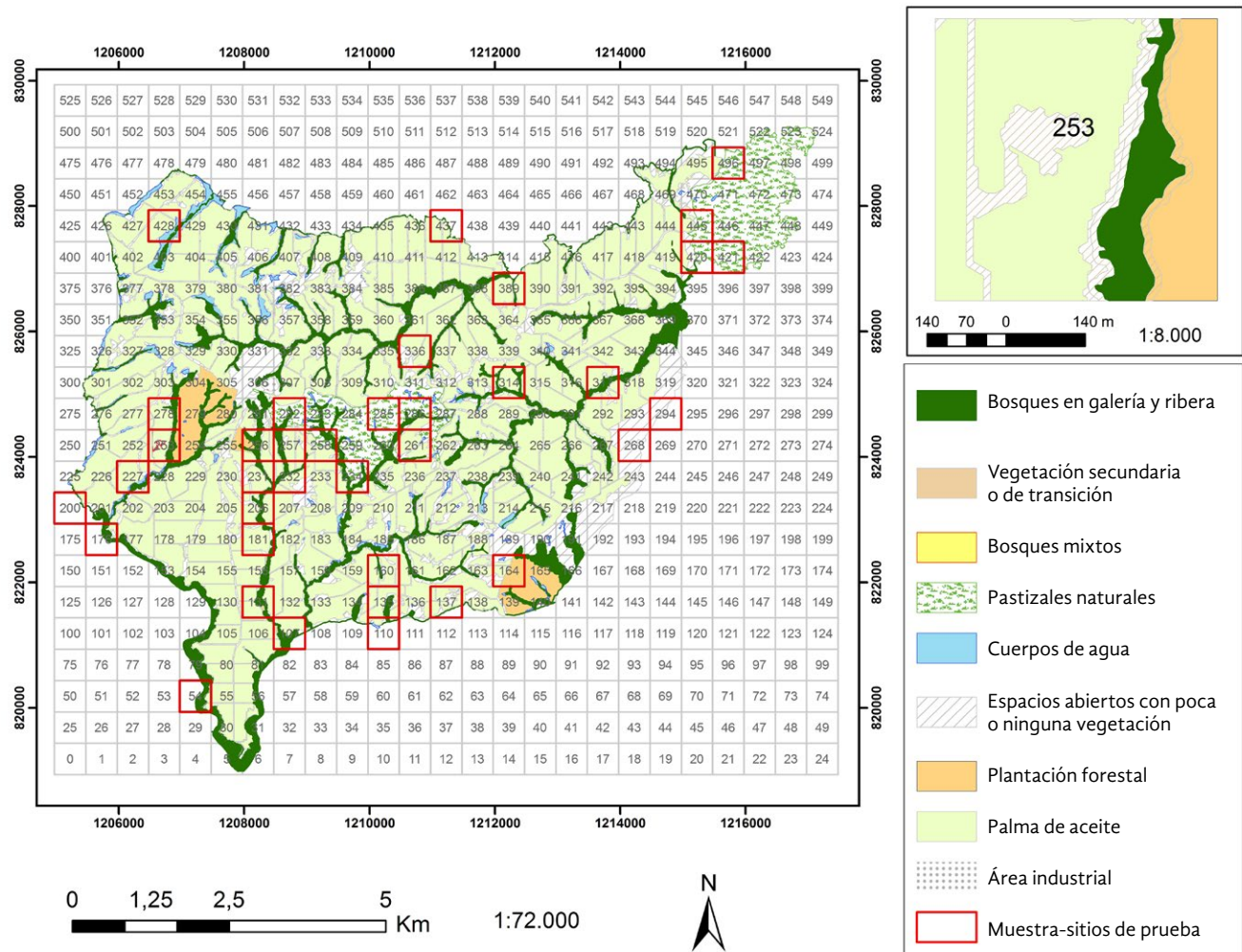
de palma de aceite, bosques mixtos, bosques en galería y ribera, producción de madera, vegetación secundaria o de transición, cuerpos de agua, pastizales naturales, espacios abiertos con poca o ninguna vegetación y áreas industriales.

Se dividió el mapa de cobertura del suelo en una celda de cuadrícula de ráster (500 x 500 metros) para seleccionar los sitios de muestra con el fin de tomar fotografías aéreas en la plantación. En segundo lugar, se calcularon las siguientes métricas del paisaje utilizando V-LATE (Lang y Tiede 2003) en ArcGIS Versión 10.6: proximidad, densidad de bordes, borde total, borde medio del parche, diversidad de Shannon, uniformidad y dominancia de Shannon. Se compro-

bó la intercorrelación lineal de todas las métricas y se eliminaron las variables con valores R superiores a $\pm 0,5$ para evitar la intercorrelación. En tercer lugar, se calculó un análisis de conglomerados de *k-means* utilizando R y el paquete Vegan versión 2.5-6. El análisis de conglomerados dio como resultado 9 grupos o conglomerados (en adelante, tipos estructurales de paisaje (TEP)). En cuarto lugar, se seleccionaron aleatoriamente 4 cuadrados por tipo estructural de paisaje. La selección dio como resultado 36 sitios de prueba (Figura 6).

Las fotografías aéreas se adquirieron mediante la recopilación de imágenes de los UAS para, primero, actualizar y verificar la cobertura del suelo; segundo,

Figura 6. Distribución de los 36 sitios de prueba en el predio Macondo



corroborar la información de los mapas de cobertura del suelo (2009) y la situación actual (2019) y, tercero, evaluar el cambio de la cobertura del suelo. Como UAS se utilizó un dron DJI, Mavic Pro 2 con cámara de 20 mpx, RGB. Por último, se tomaron más de 10.800 fotografías aéreas a una altura de 100 metros para crear una ortofotografía digital de cada lugar de prueba. Luego, la autora principal las interpretó a escala de 1:1.000, ya que tenía experiencia y conocimiento del área. Para cada celda de cuadrícula se midieron las áreas de los tipos de vegetación. Estas me-

diciones se transformaron en áreas proporcionales comparando la cobertura del suelo en 2009 y 2019.

Resultados

Para ello, se subieron las fotografías aéreas a la plataforma DroneDeploy para crear 36 ortofotomosaicos (Figura 7). Los sitios de prueba resultantes representaron 900 ha del área total de la plantación.

Los resultados mostraron un fuerte aumento en los bosques en galería y ribera (de 6,19 % a 15,49 %) y

la vegetación secundaria o de transición (de 11,37 % a 15,20 %), durante la última década. En las conclusiones se observó una importante disminución en el área proporcional entre 2009 y 2019 en producción de madera (de 3,08 % a 0,91 %), pastizales naturales (de 16,60 % a 8,98 %) y espacios abiertos con poca o ninguna vegetación (de 18,35 % a 11,75 %), mientras que bosques en galería y ribera, vegetación secundaria o de transición y plantación de palma de aceite aumentaron en el área (Figura 8).

La Tabla 1 representa el cambio en la cobertura del suelo durante la última década. Las clases de cobertura del suelo en 2009 están en las columnas y las de 2019 en las filas. La disminución en el área de cobertura proporcional del suelo revela que: (i) alrededor de 13 ha de plantación de madera se han convertido en vegetación secundaria o de transición; (ii) alrededor de 21 ha de pastizales naturales se han convertido en bosques en galería y ribera, 11 ha en espacios abiertos y 40 ha en vegetación secundaria o de transición; (iii) alrededor de 26 ha de espacios abiertos se han convertido en bosques

en galería y ribera, 56 ha en plantaciones de palma de aceite y 61 ha en vegetación secundaria o de transición; (iv) alrededor de 52 hectáreas de vegetación secundaria o de transición se han convertido en bosques en galería y ribera y 32 ha en espacios abiertos con poca o ninguna vegetación (Tabla 1).

El cambio más notable en la cobertura del suelo durante la última década es el aumento en el área de bosques en galería y ribera (de 6,19 % a 15,49 %) a lo largo de los cuadrados de la muestra (Figura 9).

Discusión

La plantación Poligrow, en el predio Macondo, ha implementado las HGP durante más de una década, lo que ha ayudado a conservar, restaurar y mantener los ecosistemas locales. Los resultados muestran que los ecosistemas naturales como los bosques en galería y ribera han aumentado, lo que puede impulsar los servicios ecosistémicos. Estos

Figura 7. Mapa del predio Macondo que muestra el cambio de cobertura del suelo entre 2009 y 2019 y la ortofotografía de un cuadrado de muestra

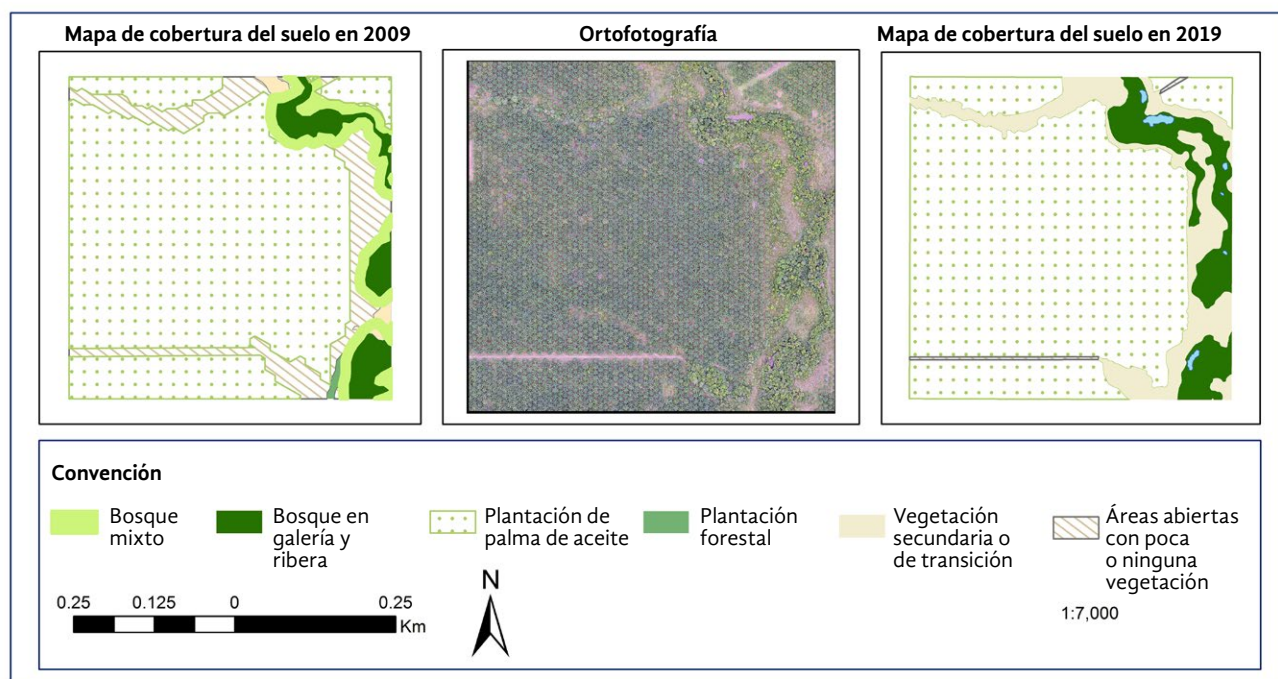


Figura 8. Cambios en las áreas proporcionales de las coberturas del suelo en la plantación (2009-2019)

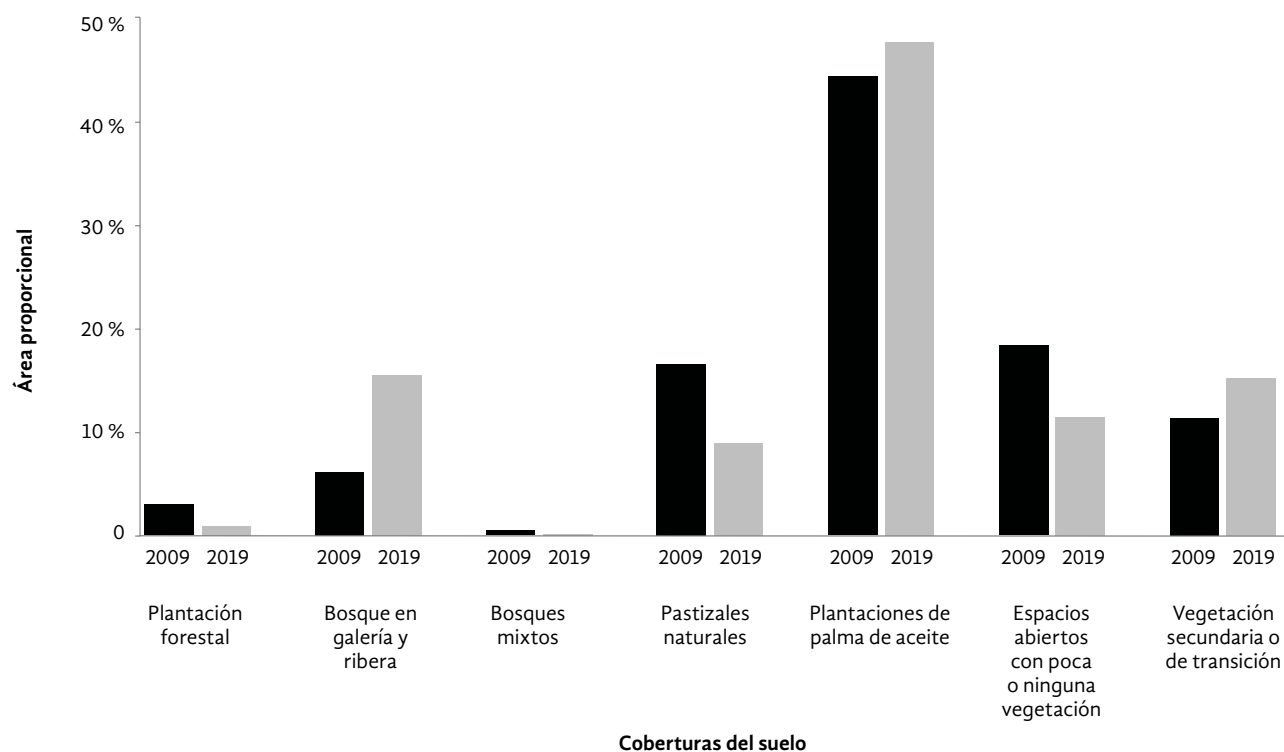
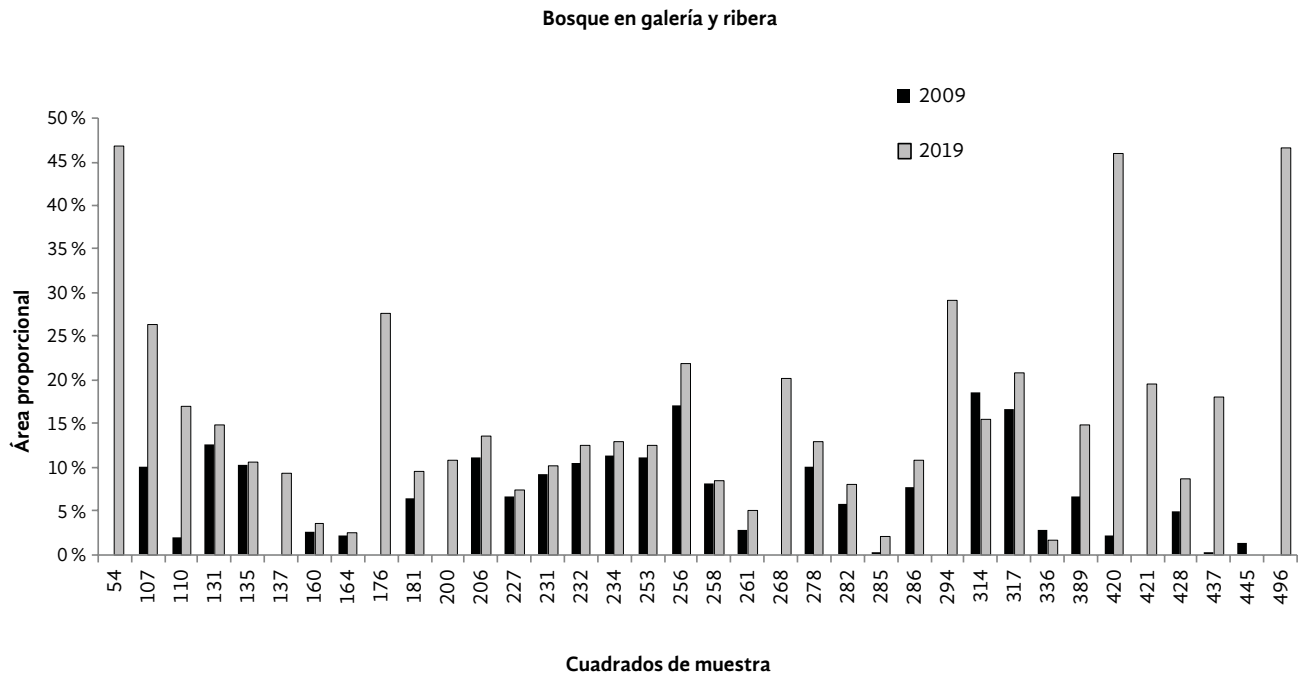


Tabla 1. Matriz de cambio de uso del suelo que compara el cambio de cobertura del suelo entre 2009 y 2019

2019				2009				
Área (ha)	Producción de madera	Bosque en galería y ribera	Bosques mixtos	Pastizales naturales	Plantación de palma de aceite	Espacios abiertos con poca o ninguna vegetación	Vegetación secundaria o de transición	Gran total
Producción de madera	7,30	0,19	0,00	0,16	0,02	0,73		8,39
Bosque en galería y ribera	1,24	44,44	1,40	21,02	0,69	26,32	51,57	146,70
Bosques mixtos		0,04	0,03	0,06	0,06	0,51		0,68
Pastizales naturales		0,19		75,23	0,35	5,62	0,32	81,71
Plantación de palma de aceite	2,08	1,71	0,13	1,42	365,94	55,72	7,65	434,65
Espacios abiertos con poca o ninguna veg.	3,98	0,10		10,68	4,77	14,87	32,32	66,73
Vegetación secundaria o de transición	13,15	8,77	2,41	39,47	5,23	61,31	10,19	140,52
Gran total	27,75	55,43	3,97	148,04	377,06	165,09	102,05	879,39

Figura 9. Comparación del área proporcional de un tipo de vegetación (bosques en galería y ribera) entre 2009 y 2019



servicios pueden beneficiar a la plantación misma a través de la polinización, la formación del suelo y el control de plagas, como lo muestra Qiu (2019). El diseño de la plantación ha cambiado a lo largo de los años debido a la implementación de las HGP, lo que diversifica los tipos y tamaños de los lotes de palma de aceite (es decir, vegetación natural y palmas de aceite) como lo muestran Azhar *et al.* (2015). Este diseño proporciona varios hábitats y fuentes de alimento para la fauna local, mejorando la conectividad del paisaje y el movimiento de los animales (p. ej. Bennett, 1999). Las HGP van de la mano con las estrategias de gestión del paisaje de ahorro y reparto de tierras (e.d *land sparing*, *land sharing*) que también se implementan en la plantación Poligrow. Estas estrategias construyeron un paisaje agrícola resiliente para la fauna y la flora locales, la provisión de servicios ecosistémicos y para atender a cualquier desastre natural y al cambio climático (Agrawal *et al.*, 2014).

Implementación de herramientas de gestión del paisaje

La implementación de las HGP y el reparto y el ahorro de tierras (e.d *land sharing*, *land sparing*) como estrategias de gestión de tierras agrícolas tiene como objetivo equilibrar la producción y la conservación de la biodiversidad. Esto corresponde a su mantenimiento y mejora junto con la producción de aceite de palma (Espinosa *et al.*, 2018), como se muestra en los resultados con el aumento en las áreas de bosques en galería y ribera, y de vegetación secundaria. Entonces, es posible argumentar que la implementación de las HGP ofrece una oportunidad para que los proyectos de palma de aceite consideren una matriz heterogénea (e. d el reparto de tierras y los enfoques de ahorro de tierras). De igual forma, estas podrían mejorar la situación actual de las áreas tropicales de extrema fragmentación, la pérdida de biodiversidad y, al mismo tiempo, la necesidad de producción agrícola (Perfecto y Vandermeer, 2010).

Cabe mencionar que hoy en día en Colombia, la expansión de la palma de aceite se ha producido principalmente en pastos en ecosistemas anteriormente alterados en lugar de tierras boscosas (Etter *et al.*, 2013). Estos suelos ofrecen una oportunidad para mejorar las condiciones del ecosistema y la producción agrícola, por lo tanto, las plantaciones sostenibles de palma de aceite con las HGP como la cobertura del suelo, la reforestación y los corredores biológicos contribuyen a la conectividad del paisaje y al aumento de los servicios ecosistémicos (p. ej. Azhar *et al.*, 2013; Pardo *et al.*, 2019). Como se muestra aquí, la plantación Poligrow ha planeado cuidadosamente la implementación de estas herramientas. Esto ha afectado el aumento del área proporcional de los ecosistemas naturales como los bosques en galería y ribera y la vegetación secundaria o de transición. El cambio en la cobertura del suelo podría afectar positivamente la riqueza de las especies y el movimiento de la vida silvestre sin afectar el rendimiento de los cultivos (Höbinger *et al.*, 2012). El aumento en el área de bosques en galería y ribera es significativo porque son “ecosistemas ricos en especies en la interfaz entre los pastizales por un lado, y los arroyos, ríos y humedales por el otro [...] [destacando] la importancia de mantener las prácticas de uso de la tierra” (Veneklaas *et al.*, 2005; 247) que apoyan la funcionalidad, morfología y biodiversidad (Veneklaas *et al.*, 2005) de estos bosques en el área de estudio. Las plantaciones de palma de aceite como Poligrow desempeñan un papel importante en el paisaje a nivel regional, lo que permite el movimiento de especies y la conexión de parches forestales (Meijaard *et al.*, 2018).

El área entre los bosques y la palma de aceite está de alguna manera “abandonada”, sin ninguna intervención o manejo. Estas áreas abandonadas son una oportunidad para la vegetación sucesiva y la restauración pasiva que ayuda a rehabilitar la vegetación anterior (Atkinson y Bonser, 2020; Cramer *et al.*, 2008), en este caso, los bosques en galería y ribera. Es posible que la vegetación sea reemplazada en el corto plazo (Lepš, 1987); también podría explicar el aumento del área en bosques en galería y ribera. El crecimiento del área de vegetación secundaria o de transición genera ecotonos en la plantación. Estos son zonas de transición entre

ecosistemas (Fortin *et al.*, 2000). Estos son componentes importantes del paisaje porque tienen una gran influencia en su estructura y función (Fagan *et al.*, 2003; Fortin *et al.*, 2000). En los sistemas agrícolas, los ecotonos proporcionan heterogeneidad y mejoran la biodiversidad local de los organismos beneficiosos (Duelli, 1997).

Por último, es importante tener en cuenta factores vitales como los mapas de la Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA) para visualizar la frontera agrícola y la aptitud del suelo para la palma de aceite, con el fin de tomar decisiones sobre la expansión agrícola, el cambio de uso de tierras y vegetación, y gestionar y planificar el uso del suelo.

El uso de UAS para evaluar el cambio de cobertura del suelo

El uso de UAS para analizar el paisaje es una herramienta esencial para monitorear los cambios en la cobertura del suelo, así como los recursos y la gestión de las plantaciones. Las ortofotografías proporcionan información relevante sobre la estructura horizontal y el cambio de la cubierta del suelo durante la última década. Además, la fotografía aérea es un método barato y rápido para realizar verificaciones terrestres “en tiempo real” y generar ortofotografías detalladas y de alta resolución. Para el presente estudio, el método basado en tierra se vio restringido por la accesibilidad, el tiempo y las limitaciones de recursos. Los resultados sugieren que la fotografía aérea proporcionó la información necesaria para analizar el paisaje a pesar de las limitaciones.

Conclusión

De acuerdo con los resultados, la implementación de herramientas de gestión del paisaje juega un papel importante para mejorar el desarrollo de las plantaciones de palma de aceite y mantener o mejorar los ecosistemas naturales y la diversidad local.

Este estudio destaca la importancia de incorporar el uso de UAS y el análisis del cambio de la cubierta del suelo a lo largo del tiempo. Esto ofrece información crucial sobre el manejo de las plantaciones y cualquier cambio en la vegetación.

Las variaciones generales en el paisaje muestran una tendencia a aumentar en el área de los ecosistemas naturales (e. d. bosques en galería y ribera y vegetación secundaria o de transición) que reemplazan los pastizales naturales y los espacios abiertos con poca o ninguna vegetación.

Se necesita más investigación para tener una mayor consistencia en la interpretación de los mapas. Por ejemplo, utilizando la nomenclatura de la cubierta del suelo CORINE, las mismas escalas y siguiendo un método determinado para monitorear el cambio de la cubierta del suelo.

Declaración de divulgación

Los datos utilizados en este estudio pertenecen por completo a la empresa y fueron proporcionados a la primera autora por sus representantes con fines de investigación. La primera autora trabajó previamente en la compañía antes de este estudio de investigación. Otros autores que participan en este artículo confirman que “no hay conflicto de intereses” relevante para el tema de este manuscrito.

Terminología

Métricas del paisaje: unidades de medida de la composición y configuración del paisaje en el tiempo. Estas métricas permiten determinar si los patrones espaciales han cambiado con el tiempo o si los paisajes presentan patrones diferentes o similares (Turner *et al.*, 2001)

Conglomerados de *k-means*: es un algoritmo para encontrar la agrupación óptima de los datos (Bryan, 2006; Celebi *et al.*, 2013).

Unmanned Aerial Systems (UAS): los sistemas aéreos no tripulados (en español), son herramientas electrónicas para la toma de fotografías aéreas. En este caso, se usó un dron de la marca DJI, para realizar las fotografías aéreas de la plantación.

Reconocimientos

Esta investigación fue apoyada por el DAAD (Deutsche Akademische Austauschdienst) y la Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite (Fedepalma). Agradecemos a Poligrow Colombia S. A. S. por su ayuda y apoyo durante la investigación.

Referencias

- Agrawal, A., Wollenberg, E. & Persha, L. (2014). Governing Agriculture-Forest Landscapes to Achieve Climate Change Mitigation. *Global Environmental Change*, 29, 270-280. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2014.10.001
- Ardila, N. J. M. & García, U. G. M. (2010). *Leyenda nacional de coberturas de la tierra: Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia: Escala 1: 100.000*. IDEAM.
- Atkinson, J. & Bonser, S. P. (2020). “Active” and “Passive” Ecological Restoration Strategies in Meta-Analysis. Recuperado de <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/rec.13229>
- Azhar, B., Lindenmayer, D. B., Wood, J., Fischer, J., Manning, A., McElhinny, C. & Zakaria, M. (2011). The Conservation Value of Oil Palm Plantation Estates, Smallholdings and Logged Peat Swamp Forest For Birds. *Forest Ecology and Management*, 262(12), 2306-2315. doi: 10.1016/j.foreco.2011.08.026
- Azhar, B., Lindenmayer, D. B., Wood, J., Fischer, J., Manning, A., McElhinny, C. & Zakaria, M. (2013). The Influence of Agricultural System, Stand Structural Complexity and Landscape Context on Foraging Birds in Oil Palm Landscapes. *Ibis*, 155(2), 297-312. doi: 10.1111/ibi.12025

- Azhar, B., Saadun, N., Puan, C. L., Kamarudin, N., Aziz, N., Nurhidayu, S. & Fischer, J. (2015). Promoting Landscape Heterogeneity to Improve the Biodiversity Benefits of Certified Palm Oil Production: Evidence From Peninsular Malaysia. *Global Ecology and Conservation*, 3, 553-561. doi: 10.1016/j.gecco.2015.02.009
- Bastidas Pérez, S. (2013). Híbrido OxG Corpoica Elmira de palma de aceite, avances en el desarrollo de materiales genéticos resistentes a la PC. *Revista Palmas*, 34(2), 135-141.
- Bennett, A. F. (1999). *Linkages in the Landscape: The Role Of Corridors and Connectivity in Wildlife Conservation*. Iucn.
- Bianchi, F. J. J. A., Booij, C. J. H. & Tscharntke, T. (2006). Sustainable Pest Regulation in Agricultural Landscapes: A Review on Landscape Composition, Biodiversity and Natural Pest Control. *Proceedings: Biological Sciences*, 1595, 1715. edsjsr. doi: 10.1098/rspb.2006.3530
- Boons, F. & Mendoza, A. (2010). Constructing Sustainable Palm Oil: How Actors Define Sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 18(16), 1686-1695. doi: 10.1016/j.jclepro.2010.07.003
- Borin, M., Passoni, M., Thiene, M. & Tempesta, T. (2010). Multiple Functions of Buffer Strips in Farming Areas. *European Journal of Agronomy*, 32(1), 103-111. doi: 10.1016/j.eja.2009.05.003
- Bryan, B. A. (2006). Synergistic Techniques for Better Understanding and Classifying the Environmental Structure of Landscapes. *Environmental Management*, 37(1), 126-140. doi: 10.1007/s00267-004-0058-1
- Bryson, M., Reid, A., Ramos, F. & Sukkarieh, S. (2019). Airborne Vision-Based Mapping and Classification of Large Farmland Environments. *Journal of Field Robotics*, 27(5), 632-655. doi: 10.1002/rob.20343
- Caccetta, P., Collings, S., Devereux, A., Hingee, K., McFarlane, D., Traylen, A., Wu, X. & Zhou, Z.-S. (2016). Monitoring Land Surface and Cover in Urban and Peri-Urban Environments Using Digital Aerial Photography. *International Journal of Digital Earth*, 9(5), 457-475. a9h.
- Celebi, M. E., Kingravi, H. A. & Vela, P. A. (2013). A Comparative Study of Efficient Initialization Methods for the K-Means Clustering Algorithm. *Expert Systems with Applications*, 40(1), 200-210. doi: 10.1016/j.eswa.2012.07.021
- Cenipalma, Fedepalma & SENA. (2017). Corporación Centro de Investigación en Palma de Aceite, Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite, Centro Nacional de Aprendizaje (SENA). *Mejores prácticas agroindustriales del cultivo de la palma de aceite en Colombia*.
- Conpes 3510. (2008). *Documento Conpes 3510. Lineamientos de política para promover la producción sostenible de biocombustibles en Colombia*. Consejo Nacional de Política Económica y Social (Conpes), República de Colombia, Departamento Nacional de Planeación (DNP).

- Cramer, V. A., Hobbs, R. J. & Standish, R. J. (2008). What's New About Old Fields? Land Abandonment and Ecosystem Assembly. *Trends in Ecology & Evolution*, 23(2), 104-112. doi: 10.1016/j.tree.2007.10.005
- DNP. (2019). Departamento Nacional de Planeación. *Plan de Desarrollo Nacional 2018-2022. Pacto por Colombia, Pacto por la Equidad*.
- Duelli, P. (1997). Biodiversity Evaluation in Agricultural Landscapes: An Approach at Two Different Scales. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 62(2), 81-91. doi: 10.1016/S0167-8809(96)01143-7
- Egan, J. F. & Mortensen, D. A. (2012). A Comparison of Land-Sharing and Land-Sparing Strategies For Plant Richness Conservation in Agricultural Landscapes. *Ecological Applications*, 22(2), 459-471. doi: 10.1890/11-0206.1
- Espinosa, J. C., Gómez, R., Lozano, M. & Moreno, Y. (2018). *Una mirada al Proyecto Paisaje Palmero Biodiverso*.
- Etter, A., Castiblanco, C. & Aide, T. M. (2013). Oil Palm Plantations in Colombia: A Model of Future Expansion. *Environmental Science & Policy*, 27, 172-183. edswss.
- Fagan, W. F., Fortin, M. & Soykan, C. (2003). Integrating Edge Detection and Dynamic Modeling in Quantitative Analyses of Ecological Boundaries. *BioScience*, 53(8), 730-738. doi: 10.1641/0006-3568(2003)053[0730:IEDADM]2.0.CO;2
- Fahrig, L., Baudry, J., Brotons, L., Burel, F. G., Crist, T. O., Fuller, R. J., Sirami, C., Siriwardena, G. M. & Martin, J.-L. (2011). Functional Landscape Heterogeneity and Animal Biodiversity in Agricultural Landscapes. *Ecology Letters*, 14(2), 101-112. doi: 10.1111/j.1461-0248.2010.01559.x
- Fortin, M. J., Olson, R. J., Ferson, S., Iverson, L., Hunsaker, C., Edwards, G., Levine, D., Butera, K. & Klemas, V. (2000). Issues Related to The Detection of Boundaries. *Landscape Ecology*, 15(5), 453-466. doi: 10.1023/A:1008194205292
- Girón-Amaya, E. G., Silva Mora, A., Espinosa-Camacho, J. C., Ruíz-Delgado, J., Díaz-Florez, L. L., Castellanos-Díaz, C. A., Gil González, C. M., Uricoechea Percy, D., Arteaga Gómez, J. S. & Londoño Gutiérrez, N. (2022). *Anuario estadístico 2020. Principales cifras de la agroindustria de la palma de aceite en Colombia 2017-2021*. Recuperado de <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/anuario/index>
- Gong, P., Biging, G. S., Lee, S. M., Mei, X., Sheng, Y., Pu, R., Xu, B., Schwarzer, K.-P. & Mostafa, M. (1999). Photo Ecometrics for Forest Inventory. *Geographic Information Sciences*, 5(1), 9-14. doi: 10.1080/10824009909480508
- González-Olarte, G. & Fadul-Escovar, T. (2014). Presencia de león montuno (*Puma concolor*) y las prácticas de conservación de su hábitat en un cultivo de palma de aceite sostenible en Mapiripán, Meta. *Revista Palmas*, 35(4), 31-37.

- Gray, C. L., Simmons, B. I., Fayle, T. M., Mann, D. J. & Slade, E. M. (2016). Are Riparian Forest Reserves Sources of Invertebrate Biodiversity Spillover and Associated Ecosystem Functions in Oil Palm Landscapes? *Biological Conservation*, 194(Supplement C), 176-183. doi: 10.1016/j.biocon.2015.12.017
- Gray, C. L., Slade, E. M., Mann, D. J. & Lewis, O. T. (2014). Do Riparian Reserves Support Dung Beetle Biodiversity and Ecosystem Services in Oil Palm-Dominated Tropical Landscapes? *Ecology & Evolution* (20457758), 4(7), 1049-1060. a9h.
- Green, R. E., Cornell, S. J., Scharlemann, J. P. W. & Balmford, A. (2005). Farming and the Fate of Wild Nature. *Science*, 307(5709), 550. doi: 10.1126/science.1106049
- Höbinger, T., Schindler, S., Wrba, T., Seaman, B. S. & Weissenhofer, A. (2012). Impact of Oil Palm Plantations on the Structure of the Agroforestry Mosaic of La Gamba, Southern Costa Rica: Potential Implications for Biodiversity. *Agroforestry Systems*, 85(3), 367-381. edselc. doi: 10.1007/s10457-011-9425-0
- International Union for Conservation of Nature (IUCN). (2018). *Palm Oil and Biodiversity* [Resource]. IUCN. Recuperado de <https://www.iucn.org/resources/issues-brief/palm-oil-and-biodiversity>
- Khatun, R., Reza, M. I. H., Moniruzzaman, M. & Yaakob, Z. (2017). Sustainable Oil Palm Industry: The possibilities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76(Supplement C), 608-619. doi: 10.1016/j.rser.2017.03.077
- Koh, L. P. (2008a). Bird Defend Oil Palm from Herbivorous Insects. *Ecological Applications*, 18(4), 821-825. 8gh.
- Koh, L. P. (2008b). Can Oil Palm Plantations Be Made More Hospitable for Forest Butterflies and Birds? *Journal of Applied Ecology*, 45, 1002-1009. 8gh. doi: 10.1111/j.1365-2664.2008.01491.x
- Lepš, J. (1987). Vegetation Dynamics in Early Old Field Succession: A Quantitative Approach. *Vegetatio*, 72(2), 95-102. doi: 10.1007/BF00044839
- Lillesand, T., Kiefer, R. W. & Chipman, J. (2015). *Remote Sensing and Image Interpretation*. John Wiley & Sons.
- Lozano-Zambrano, F. (2009). *Herramientas de manejo para la conservación de la biodiversidad en paisajes rurales* (F. Lozano-Zambrano, Ed.). Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt y Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR).
- Lucey, J. M., Tawatao, N., Senior, M. J. M., Chey, V. K., Benedick, S., Hamer, K. C., Woodcock, P., Newton, R. J., Bottrell, S. H. & Hill, J. K. (2014). Tropical Forest Fragments Contribute to Species Richness in Adjacent Oil Palm Plantations. *Biological Conservation*, 169(Supplement C), 268-276. doi: 10.1016/j.biocon.2013.11.014
- Maas, B., Clough, Y., Tschardtke, T. & Courchamp, F. (2018). Bats and Birds Increase Crop Yield in Tropical Agroforestry Landscapes. *Ecology Letters*, 16(12), 1480-1487. doi: 10.1111/ele.12194

- Mba, O. I., Dumont, M.-J. & Ngadi, M. (2015). Palm Oil: Processing, Characterization and Utilization in The Food Industry-A Review. *Food Bioscience*, 10(Supplement C), 26-41. doi: 10.1016/j.fbio.2015.01.003
- Meijaard, E., García-Ulloa, J., Sheil, D., Wich, S. A., Carlson, K. M., Juffe-Bignoli, D. & Brooks, T. M. (2018). *Oil Palm and Biodiversity: A Situation Analysis by the IUCN Oil Palm Task Force*. IUCN. doi: 10.2305/IUCN.CH.2018.11.en
- Mejía-Buitrago, A. (2016). *Plan de Desarrollo “La fuerza del pueblo 2016-2019.”*
- Miccolis, A., Vasconcelos, S. S., Castellani, D. C., Kato, O. R., Carvalho, W. R. D. & Silva, A. C. D. (2014). Oil Palm and Agroforestry Systems: Coupling Yields with Environmental Services, an Experiment in The Brazilian Amazon. *Embrapa Amazônia Oriental-Resumo Em Anais de Congresso (ALICE)*.
- Montes de Oca, A., Arreola, L., Flores, A., Sánchez, J. & Flores, G. (2018). *Low-Cost Multispectral Imaging System for Crop Monitoring*. doi: 10.1109/ICUAS.2018.8453426
- Morgan, P. (2010). Towards a Developmental Theory of Place Attachment. *Journal of Environmental Psychology*, 30(1), 11-22. doi: 10.1016/j.jenvp.2009.07.001
- Najera, A. & Simonetti, J. A. (2010). Can Oil Palm Plantations Become Bird Friendly? *Agroforestry Systems*, 80(2), 203-209. doi: 10.1007/s10457-010-9278-y
- Nurdiansyah, F., Denmead, L. H., Clough, Y., Wiegand, K. & Tschardtke, T. (2016). Biological Control in Indonesian Oil Palm Potentially Enhanced by Landscape Context. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 232, 141-149. doi: 10.1016/j.agee.2016.08.006
- Ocampo-Peñuela, N., García-Ulloa, J., Ghazoul, J. & Etter, A. (2018). Quantifying Impacts of Oil Palm Expansion On Colombia's Threatened Biodiversity. *Biological Conservation*, 224, 117-121. edswsc. doi: 10.1016/j.biocon.2018.05.024
- Oosterveer, P. (2015). Promoting Sustainable Palm Oil: Viewed From A Global Networks and Flows Perspective. *Journal of Cleaner Production*, 107, 146-153. doi: 10.1016/j.jclepro.2014.01.019
- Paine, D. P. & Kiser, J. D. (2003). *Aerial Photography and Image Interpretation*. John Wiley & Sons.
- Pardo, L. E., Campbell, M. J., Cove, M. V., Edwards, W., Clements, G. R. & Laurance, W. F. (2019). Land Management Strategies Can Increase Oil Palm Plantation Use by Some Terrestrial Mammals in Colombia. *Scientific Reports*, 9(1), 7812. doi: 10.1038/s41598-019-44288-y
- Pardo-Vargas, L. E. & Payán-Garrido, E. (2015). Mamíferos de un agropaisaje de palma de aceite en las sabanas inundables de Orocué, Casanare, Colombia. *Biota Colombiana*, 16(1), 54-66.

- Perfecto, I. & Vandermeer, J. (2010). The Agroecological Matrix as Alternative to the Land-Sparing/Agriculture Intensification Model. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(13), 5786.
- Perfecto, I. & Vandermeer, J. (2012). Separation or Integration of Biodiversity Conservation: The Ideology Behind the “Land-Sharing” Versus “Land-Sparing” Debate. *Ecosistemas*, 21(1/2), 180-191. CABDirect.
- Qaim, M., Sibhatu, K. T., Siregar, H. & Grass, I. (2021). Environmental, Economic, and Social Consequences of the Oil Palm Boom. *Annual Review of Resource Economics*, 12(1), 321-344. doi: 10.1146/annurev-resource-110119-024922
- Qiu, J. (2019). Effects of Landscape Pattern on Pollination, Pest Control, Water Quality, Flood Regulation, and Cultural Ecosystem Services: A Literature Review and Future Research Prospects. *Current Landscape Ecology Reports*, 4(4), 113-124. doi: 10.1007/s40823-019-00045-5
- Rey, L., Gómez, P. L., Ayala, I. M., Delgado, W. & Rocha, P. J. (2004). Colecciones genéticas de palma de aceite *Elaeis guineensis* Jacq. y *Elaeis oleifera* (HBK) de Cenipalma: características de importancia para el sector palmicultor. *Revista Palmas*, 25(especial), 39-48.
- Rodríguez, D. A. (2010). Caracterizaciones biológicas en la Hacienda Macondo (Mapiripán, Meta). *Orinoquia*, 14, 18-27.
- Schroth, G., da Fonseca, G., Harvey, C., Gascon, C., Vasconcelos, H. & Izac, A.-M. (2004). Introduction: The Role of Agroforestry in Biodiversity Conservation in Tropical Landscapes. En G. Schroth, G. A. B. da Fonseca, C. A. Harvey, C. Gascon, H. L. Vasconcelos & A.-M. N. Izac (Eds.), *Agroforestry and Biodiversity Conservation in Tropical Landscapes* (pp. 1-12).
- Stöcker, C., Nex, F., Koeva, M. & Gerke, M. (2017). Quality Assessment of Combined IMU/GNSS Data for Direct Georeferencing in the Context Of UAV-Based Mapping. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W6, 355-361. doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W6-355-2017
- Teuscher, M., Vorlaufer, M., Wollni, M., Brose, U., Mulyani, Y. & Clough, Y. (2015). Trade-Offs between Bird Diversity and Abundance, Yields and Revenue in Smallholder Oil Palm Plantations in Sumatra, Indonesia. *Biological Conservation*, 186, 306-318. a9h.
- Thomson, A. G., Manchester, S. J., Swetnam, R. D., Smith, G. M., Wadsworth, R. A., Petit, S., & Gerard, F. F. (2007). The Use of Digital Aerial Photography and CORINE-Derived Methodology for Monitoring Recent and Historic Changes in Land Cover Near UK Natura 2000 Sites for the BIOPRESS Project. *International Journal of Remote Sensing*, 28(23), 5397-5426. doi: 10.1080/01431160601105868
- Torres, D. A. R. (2010). Caracterizaciones biológicas en la Hacienda Macondo (Mapiripán, Meta). *Orinoquia*, 14(2 sup), 18-27.

- Tscharntke, T., Bommarco, R., Clough, Y., Crist, T. O., Kleijn, D., Rand, T. A., Tylianakis, J. M., Nouhuys, S. van & Vidal, S. (2007). Reprint of Conservation Biological Control and Enemy Diversity on a Landscape Scale. *Biological Control*, 45(2), 238-253. doi: 10.1016/S1049-9644(08)00082-0
- Turner, M. G., Gardner, R. H. & O'Neill, R. V. (2001). *Landscape Ecology in Theory and Practice*. Springer.
- Unidad de Planificación Rural (UPRA). (2018). *Metodología para la identificación general de la frontera agrícola en Colombia*.
- Veneklaas, E. J., Fajardo, A., Obregon†, S. & Lozano, J. (2005). Gallery Forest Types and their Environmental Correlates in A Colombian Savanna Landscape. *Ecography*, 28(2), 236-252. doi: 10.1111/j.0906-7590.2005.03934.x
- Vijay, V., Pimm, S. L., Jenkins, C. N. & Smith, S. J. (2016). The Impacts of Oil Palm on Recent Deforestation and Biodiversity Loss. *PLOS ONE*, 11(7), e0159668. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0159668>

Reutilización sostenible de residuos agroindustriales en ladrillos de cemento ecológico*

A Sustainable Reuse of Agro-IndustrialWastes into Green Cement Bricks

CITACIÓN: Chin, W. Q., Lee, Y. H., Amran, M., Fediuk, R., Vatin, N., Kueh, A. B. H. & Lee, Y. Y. (2023). Reutilización sostenible de residuos agroindustriales en ladrillos de cemento ecológico (Traductor Arenas, C.). *Palmas*, 44(2), 80-103.

NOTA DEL EDITOR: MDPI se mantiene neutral con respecto a las reclamaciones jurisdiccionales en los mapas publicados y las afiliaciones.

PALABRAS CLAVE: Residuos agroindustriales, POFA, Cuesco de palma de aceite, Polvo de cantera, Carbonato de calcio, Ladrillo.

KEYWORDS: Agro-industrial waste, POFA, Oil palm shell, Quarry dust, Calcium carbonate, Brick.

* Traducido del original A Sustainable Reuse of Agro-Industrial Wastes into Green Cement Bricks. *Materials* 2022, 15, 1713. <https://doi.org/10.3390/ma15051713>

Editores académicos: F. Pacheco Torgal y P. J. Sánchez-Soto.

Derechos de autor: © 2002 por los autores. Licenciatario MDPI, Basilea, Suiza. Este artículo es de acceso abierto y se distribuye de acuerdo con los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Attribution (CC BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Resumen

La fabricación de ladrillos suele consumir una cantidad relativamente alta de recursos naturales. Para reducir la huella de carbono en la industria que se encarga de su producción, la re-

CHIN, WEI QUAN

Departamento de Ingeniería Civil y de la Construcción, facultad de Ingeniería y Ciencia, Curtin University Malaysia, CDT 250, Miri 98009, Sarawak, Malasia.

LEE, YEONG HUEI

Departamento de Ingeniería Civil y de la Construcción, facultad de Ingeniería y Ciencia, Curtin University Malaysia, CDT 250, Miri 98009, Sarawak, Malasia.

AMRAN, MUGAHED*

Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Prince Sattam Bin Abdulaziz, Alkharj 16273, Arabia Saudí. Departamento de Ingeniería Civil, facultad de Ingeniería e Informática, Universidad de Amran, Amran 9677, Yemen.

*Autor para correspondencia: m.amran@psau.edu.sa

FEDIUK, ROMAN

Instituto Politécnico, Universidad Federal del Lejano Oriente, 690922 Vladivostok, Rusia; fedyuk.rs@dvfu.ru. Universidad Politécnica de San Petersburgo Pedro el Grande, 195251 San Petersburgo, Rusia.

VATIN, NIKOLAI

Universidad Politécnica de San Petersburgo Pedro el Grande, 195251 San Petersburgo, Rusia; vatin@mail.ru

KUEH, AHMAD BENG HONG

Departamento de Ingeniería Civil, facultad de Ingeniería e Informática, Universidad de Amran, Amran 9677, Kota Samarahan 94300, Sarawak, Malasia; kbhahmad@unimas.my (A. B. H. K.)

LEE, YEE YONG

Departamento de Ingeniería Civil, facultad de Ingeniería e Informática, Universidad de Amran, Amran 9677, Kota Samarahan 94300, Sarawak, Malasia; yylee@unimas.my (Y. Y. L.)

utilización de residuos industriales en la fabricación de ladrillos sostenibles es una tendencia reciente en la aplicación y la investigación. Los residuos locales como el cuesco de palma de aceite (OPS por sus siglas en inglés - *oil palm shell*), la ceniza de caldera de aceite de palma (POFA por sus siglas en inglés - *palm oil fuel ash*) y el polvo de cantera (QD por sus siglas en inglés - *quarry dust*) se producen anualmente de forma masiva en los países exportadores de aceite de palma. Además, el QD de las industrias mineras es peligroso tanto para la calidad del agua como del aire. Para mejorar la gestión de los residuos y avanzar hacia la sostenibilidad, habría que darles una segunda vida como materiales de construcción. Por lo tanto, este artículo investiga la posibilidad de incorporar residuos agroindustriales a la mezcla de ladrillos, examinando sus propiedades mediante varias pruebas normalizadas. Para el diseño de la mezcla se consideran experimentalmente un reemplazo del 100 % del agregado grueso con OPS, un reemplazo del 20 % del cemento con POFA, 20 % del peso de cemento de piedra caliza como aditivo y un reemplazo del 0 al 50 % del agregado fino con QD. La mezcla óptima de estos residuos se determina preliminarmente centrándose en la alta resistencia a la compresión como indicador. Otros análisis incluyen la resistencia a la rotura, la tracción y la flexión, la absorción de agua y las pruebas de eflorescencia. Aunque el ladrillo de cemento que incorpora residuos agroindustriales tiene una relación de resistencia a peso 18 % más baja en comparación con el ladrillo convencional, se observa que tiene un mejor desarrollo tardío de la resistencia debido a las propiedades puzolánicas de la POFA. Además, se comprueba que el ladrillo de cemento ecológico propuesto cumple con varias normas para su uso viable en la industria de la construcción. En términos financieros, el costo del ladrillo con el nuevo diseño de mezcla es casi equivalente al del convencional. Por lo tanto, es razonable emplearlo en el sector de la construcción para promover la sostenibilidad de los materiales y mejorar la gestión de los residuos.

Abstract

The fabrication of bricks commonly consumes relatively high natural resources. To reduce the carbon footprint in the brick production industry, repurposing industrial wastes in the making of sustainable bricks is a recent trend in research and application. Local wastes, such as oil palm shell (OPS), palm oil fuel ash (POFA), and quarry dust (QD), are massively produced annually in the palm oil-exporting countries. Moreover, QD from mining industries is hazardous to both water and air quality. For better waste management in marching towards sustainability, these wastes should be given their second life as construction materials. Therefore, this paper investigates the possibility of incorporating agro-industrial wastes into the brick mixture by examining their properties by means of several standardized tests. For the mix design, a 100% replacement of coarse aggregate with OPS, 20% replacement of cement with POFA, 20% cement weight of limestone as admixture, and 0 to 50% replacements of fine aggregate with QD are experimentally considered. The optimum mix of these wastes is preliminarily determined by focusing on high compressive strength as an indicator. Other examinations include splitting tensile, flexural strength, water absorption, and efflorescence tests. Although the agro-industrial waste cement brick is 18% lower in the strength to weight ratio compared to that of conventional, it is observed that it has better late strength development due to its POFA pozzolanic properties. Moreover, the proposed green cement brick is further checked for compliance with several standards for feasible use in the construction industry. Financially, the cost for the brick with the new mix design is almost equivalent to that of conventional. Hence, this green cement brick is reasonable to be employed in the construction industry to promote material sustainability for better waste management.

1. Introducción

Los ladrillos son materiales de construcción de uso común que se emplean activamente en la gran ma-

yoría de las obras de este tipo. Debido a sus notables características, como su gran resistencia, bajos costos de producción y durabilidad, han desempeñado un papel significativo en la construcción durante miles

de años [1-3]. El ladrillo fue un importante material de construcción en Egipto, Roma y Mesopotamia [4]. A medida que se introdujo el cemento como aglutinante del hormigón, el ladrillo de arcilla también se desarrolló de forma innovadora para convertirse en ladrillo de cemento y reducir así el consumo de energía calorífica que se utilizaba en la producción de ladrillos de arcilla. Tanto los ladrillos de arcilla como los de cemento son utilizados en la industria de la construcción hoy en día. Una de las tareas más difíciles a las que se enfrenta el sector de la construcción es mejorar la sostenibilidad, y se están estudiando materiales de construcción alternativos para compensar el impacto ambiental y cumplir las normas de desarrollo, fabricación y consumo sostenibles [5,6]. La sostenibilidad apoya la colaboración polifacética e interdisciplinaria en el sector de la construcción para satisfacer las necesidades humanas, incluyendo las de vivienda, y para organizar entornos de calidad para la sociedad [7]. La producción de ladrillos es un proceso que consume mucha energía y cantidades considerables de recursos naturales como piedra caliza, arcilla, grava, arena de río, entre otros [8]. Para remediarlo, desde hace unos años se están introduciendo materiales sostenibles como alternativa a los materiales de ladrillos convencionales para reducir la huella de carbono. Los residuos agrícolas, como las cenizas de cáscara de arroz [9,10], los lodos de aguas residuales [11], lodos de curtiduría [12] y los residuos de polvo [13], entre otros, son algunos de los materiales que hoy en día se consideran para este propósito. Malasia, uno de los principales productores de aceite de palma, genera grandes cantidades de residuos en términos de masa seca resultantes de la actividad de producción [14], por lo que se hace necesario tomar fuertes medidas correctivas. En particular, los residuos identificados de la industria del aceite de palma son el cuesco de palma de aceite (OPS por sus siglas en inglés) y las cenizas de caldera de aceite de palma (POFA por sus siglas en inglés), que pueden reutilizarse como sustitutos del agregado y del cemento, respectivamente, para producir ladrillos sostenibles en consonancia con los esfuerzos mundiales por mejorar la gestión de residuos.

La industria de la construcción y la demolición representa el 40 % del consumo mundial de energía y un tercio de las emisiones de gases de efecto invernadero [15,16]. Según los reportes, a medida que aumentó la necesidad de materiales de construcción, también

aumentó el uso de materias primas y energía, particularmente durante las fases de extracción, procesamiento y transporte de materiales [17]. Actualmente se producen 2.010 millones de toneladas de residuos sólidos en el mundo y se prevé que para 2050 este volumen llegue a las 3.400 millones de toneladas por año [18]. Su uso como reemplazo de los estabilizadores en las actividades de construcción ha demostrado ser una estrategia viable para disminuir los efectos ambientales y, al mismo tiempo, proporcionar beneficios sociales y económicos [19,20]. El crecimiento urbano mundial es una de las principales causas del aumento de la producción de residuos sólidos. Los países emergentes eligen la eliminación irregular de residuos en rellenos sanitarios y vertederos abiertos [21,22]. Como resultado, se dice, por ejemplo, que reciclarlos incorporándolos a los materiales de construcción ofrece una solución a estas problemáticas relacionadas con la eliminación de residuos y la reducción del impacto ecológico [23]. Un artículo de investigación muestra que el uso de colillas de cigarrillos al 1 % en ladrillos de arcilla sinterizada puede ahorrar aproximadamente 10,2 % de la energía de combustión utilizada en el proceso de producción [23].

Debido a sus características mecánicas y físicas, así como por la creatividad de combinar diversos residuos en su fabricación, el bloque de mampostería es uno de los materiales de construcción más completos [23]. A pesar de su excelente manejabilidad y disponibilidad, es bien sabido que la fabricación de bloques de mampostería sinterizados es una operación muy intensiva en términos de recursos y energía, además de las importantes cantidades de carbono consumidas. [2,24-26]. Según los informes, una de las prioridades de la construcción civil es reducir el consumo de energía [27]. La mayor demanda de productos que sean sostenibles y respetuosos con el medio ambiente ha llevado a investigar métodos y materiales alternativos para producir ladrillos de construcción [6,28]. También se descubrió que las materias primas consumidas por este sector representan aproximadamente 24 % de la oferta mundial [29]. Por lo tanto, su elección es crítica para cumplir con el objetivo de desarrollo sostenible. Los bloques de tierra-cemento ofrecen una solución a estos problemas, ya que se crean utilizando un procedimiento que elimina la necesidad de quemarlos, reduce la cantidad de cemento utilizada y aun permite el uso de residuos en su composición. Además, su uso disminuye los gastos hasta en un 40 % en comparación con la mampostería tra-

dicional, particularmente en viviendas de bajo costo [7]. Como resultado, los bloques de cemento podrían considerarse más respetuosos con el medio ambiente que los tradicionales bloques de mampostería [6,30].

La escasez de recursos naturales y la formación de residuos sólidos sin una eliminación efectiva son preocupaciones globales [25,31-34], que permiten la viabilidad ecológica de los sistemas de construcción que fomentan la sostenibilidad de los ecosistemas y la optimización de los procesos [35,36]. Las preocupaciones globales actuales se derivan de amplias preocupaciones ecológicas, así como en el acelerado ritmo de innovación tecnológica de la industria, especialmente en la construcción; en consecuencia, ha aumentado la atención que se presta al concepto de materiales de construcción alternativos, en particular a los producidos a partir de la tierra [37]. Debido a su mala conductividad térmica, los bloques de tierra estabilizados ayudan a aumentar la eficiencia energética de la construcción. Como resultado, pueden usarse para mejorar el aislamiento acústico y térmico en edificios [38]. Sin embargo, función de las de propiedades de ingeniería, el valor de abrasión para la OPS es del 4,8 %, que es la cantidad de las muestras originales de almendras de palma de aceite molidas a un diámetro menor de 1,7 mm y, por lo tanto, es menos probable que se deteriore cuando se use como relleno base [39]. Los cuescos de palma de aceite también tienen pequeños poros entre sus fibras que proporcionan un peso ligero sin afectar la resistencia [40-44]. Hasta la fecha, se han realizado varias investigaciones sobre hormigones estructurales a partir de OPS [45-50], donde la inclusión de residuos de la industria del aceite de palma ha demostrado una excelente durabilidad del hormigón y buenas propiedades generales, al tiempo que incorpora ventajas adicionales respecto a las características de carga a pesar de tener una masa baja. Adicionalmente, se ha identificado que el polvo de cantera (QD) de la industria minera es un material útil para la matriz de hormigón, a lo que contribuyen algunas investigaciones sobre su potencial como sustituto de los agregados [51-57]. Por lo tanto, es posible reutilizar el QD en el hormigón como material de construcción para reducir el desecho de residuos de subproductos en el medio ambiente cercano, ya que este puede generar graves problemas de salud [58].

Hoy en día, el sector de la construcción tiene una gran demanda de ladrillos de cemento y las indus-

trias de Malasia producen toneladas de desechos. Con el fin de incorporar todos estos residuos locales en la matriz del hormigón y lograr una mejor gestión de los mismos, este documento investiga una mezcla de diseño factible para ser aplicada en esta propuesta de ladrillos de cemento ecológicos y así lograr el objetivo de fabricar materiales de construcción sostenibles. El enfoque principal es utilizar todos los desechos locales para reemplazar completamente el agregado grueso en ladrillos de cemento, que rara vez se encuentra en las tendencias de investigación actuales. Para obtener las propiedades mecánicas de las mezclas propuestas, el programa experimental para este estudio incluye pruebas de compresión, tracción de división, resistencia a la flexión, absorción de agua y eflorescencia. Además, se identifica su viabilidad como material de construcción sostenible al evaluar el cumplimiento con los códigos locales actuales. También se ha considerado un análisis de costos comparable al convencional para buscar el impacto financiero de su producción. Los resultados deben beneficiar y promover la sostenibilidad en la industria de la construcción.

2. Investigación experimental

El programa experimental actual para estudiar la viabilidad de los residuos locales para la producción de ladrillos se realizó en tres fases. En la Fase 1, se diseñó e identificó la mezcla; en la Fase 2, se caracterizaron las propiedades, mientras que la Fase 3, se dedicó al cumplimiento del código y al análisis de costos.

2.1 Materiales

Los desechos identificados fueron POFA, OPS y QD, que funcionaron, respectivamente, como reemplazos de cemento, agregado grueso y agregado fino para producir una mezcla de concreto liviano para la producción de ladrillos.

Los detalles adicionales para los materiales investigados son: Cemento-Cemento Portland Ordinario (C-CPo), CMC Engineering Sdn Bhd, Selangor, Malasia; un producto local que cumplía con las normas MS EN 197-1 y ASTM C150. Se utilizó POFA (Curtin University Lab, Sarawak, Malasia) como el material cementoso suplementario con tamaños de partícula que pasan a través de un tamiz de 45 μ m, tratado térmicamente.

camente a 500 °C; OPS (industria del aceite de palma de Malasia, Sarawak, Malasia) que cumplía con ASTM C33 para el dimensionamiento; QD (polvo de cantera, Sarawak Malasia) con una densidad de 1.350 kg/m³ y tamizado para mantener su rango de módulo de finura de 2,3 a 3,1 (las propiedades anteriores también se incluyeron en la Tabla 1 como referencia); Arena de río (valle de Sarawak, Malasia) con una densidad de

1.420 kg/m³ que pasa por un tamiz de 4,75 mm; superplastificante de tipo BASF-Master Glenium ACE 8589; (MasterGlenium-Master Builders Solutions, Sarawak, Malasia) y polvo de carbonato de calcio (Supra-coat WCE-22, Shandpa Al Powder Technology, Ltd., Shandong, China) como la mezcla para promover la resistencia general del hormigón. La Figura 1 muestra los materiales de la mezcla de diseño.

Tabla 1. Propiedades físicas y químicas de QD en investigaciones previas.

Propiedades		[59]	[60,61]
Físicas	Gravedad específica	1,74	2,54-2,60
	Contenido físico de agua natural	6,59 %	-
	Absorción de agua	2,34 %	1,2-1,5 %
	Densidad aparente	1,55 kg/m ³	1.720-1.810 kg/m ³
Químicas	SiO ₂	-	62,48 %
	Al ₂ O ₃	-	18,72
	Fe ₂ O ₃	-	6,54
	CaO	-	4,83
	MgO	-	2,65
	Na ₂ O	-	-
	K ₂ O	-	3,18
	TiO ₂	-	1,21
Pérdida por ignición *		-	0,48

* La pérdida por ignición es la pérdida de peso de una muestra después de ser tratada térmicamente (calentamiento/cocción) a alta temperatura, normalmente 1.000 °C, y 1 h de tiempo de remojo.

Figura 1. Materiales utilizados en la mezcla de diseño: a. C-CPo, b. POFA, c. OPS y d. grava



Distribución del tamaño de partícula

El propósito principal del análisis granulométrico fue determinar la distribución del tamaño de partícula para cada material utilizado para moldear el hormigón, cumpliendo con las normas ASTM C330M [62] y C33M [63]. Se propusieron varias mezclas de agregados finos y se tabularon en la Tabla 2, donde solo la mezcla con 50 % de QD y 50 % de arena de río cumplió con los requisitos de ASTM C33M. La clasificación de agregados gruesos se muestra en la Figura 2 para gra-

va y OPS. Ambos agregados pueden pasar a través del tamiz diametral nominal de 4,75 mm.

2.2 Diseño de la mezcla

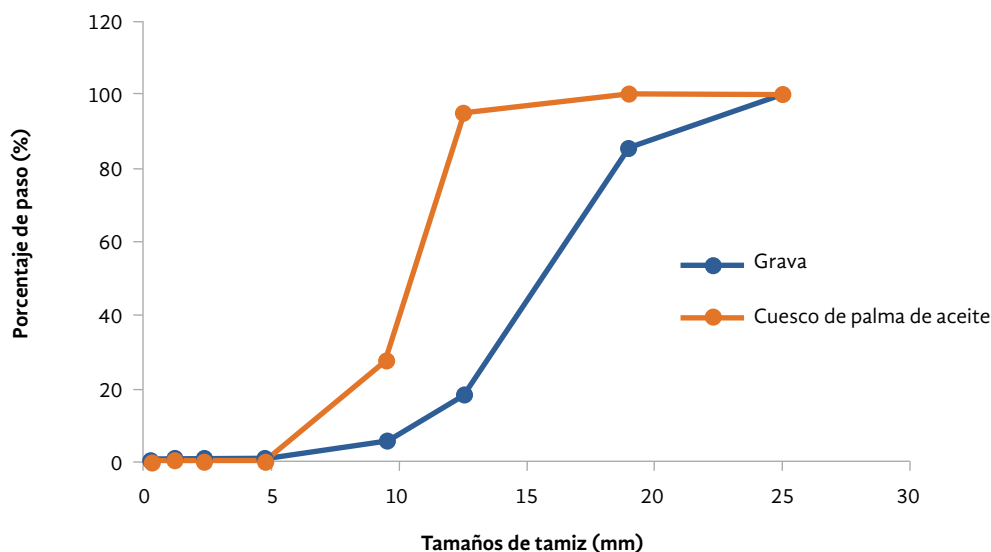
El diseño de la mezcla se fijó en 1:1:1 para cemento, agregados finos y gruesos de acuerdo con [39]. En la Fase 1, se consideró una mezcla idéntica de aglutinante (80 % de C-CPo + 20 % de POFA), agregado grueso (100 % de OPS) y agregado fino (50 % de QD + 50 % de RS) con la relación agua-cemento y el con-

Tabla 2. Módulo de finura y clasificación del agregado fino.

Proporción de mezcla	Módulo de fineza	Clasificación	Cumplimiento con el Sistema de Clasificación ASTM C33M
100 % RS	0,993	Arena fina	No Cumplido
100 % QD	3,741	Arena gruesa	No Cumplido
10 % QD + 90 % RS	1,312	Arena fina	No Cumplido
30 % QD + 70 % RS	1,612	Arena fina	No Cumplido
50 % QD + 50 % RS	2,562	Arena bien graduada	Cumplido

RS = arena de río por sus siglas en inglés (river sand), QD = polvo de cantera.

Figura 2. Comparación de la clasificación de agregados gruesos de grava y OPS



tenido de superplastificante como variables. A partir del estudio preliminar, ambas relaciones de agua-cemento de 0,45 y 0,5 fueron aceptables, mientras que se determinó que un 1 % de peso de cemento del superplastificante cumplía el objetivo del programa en esta etapa. Las mezclas pudieron fluir con asentamiento total y la resistencia a la compresión superó los 17 MPa de uso estructural. Se añadió el peso equivalente de polvo de piedra caliza con POFA a la mezcla para activar la reacción de la POFA. En la Fase 2, se analizaron 10 %, 30 % y 50 % de QD junto con la consideración de un caso de control de espécimen de hormigón convencional para la comparación. La Tabla 3 muestra la mezcla de diseño preliminar en la Fase 1. La Tabla 4 muestra el diseño de la mezcla de la Fase 2.

2.3 Métodos de prueba

A continuación, se describen los ensayos realizados para la caracterización de los especímenes de hormigón. Todos se probaron de acuerdo con los procedimientos mencionados en los códigos de práctica. Solo se ensayó un espécimen para las pruebas de asentamiento, densidad, eflorescencia y absorción de agua. Sin embargo, los valores promedio de tres especímenes se obtuvieron de las pruebas de resistencia.

2.3.1 Ensayo de hundimiento y densidad

Los ensayos de hundimiento se llevaron a cabo de acuerdo con ASTM C143 [64]. Se vertieron tres capas de la mezcla para llenar el cono junto con la aplica-

Tabla 3. Resumen del diseño de la mezcla (1 cemento: 1 agregado grueso: 1 agregado fino) y distribución de proporciones para la Fase 1.

Especimen	Aglutinante		Agregado grueso		Agregado fino		Aditivo de mezcla		Relación agua-cemento
	Cemento (%)	POFA (%)	Grava (%)	OPS (%)	Arena (%)	QD (%)	SP (%)	Piedra caliza (% de cemento)	
1	80	20	0	100	50	50	0,5	20	0,45
2	80	20	0	100	50	50	0,5	20	0,5
3	80	20	0	100	50	50	1,0	20	0,45
4	80	20	0	100	50	50	1,0	20	0,5

Tabla 4. Resumen del diseño de la mezcla y la distribución de la proporción para la Fase 2.

Especimen	Aglutinante		Agregado grueso		Agregado fino		Aditivo de mezcla	
	Cemento (%)	POFA (%)	Grava (%)	OPS (%)	Arena (%)	QD (%)	SP (%)	Piedra caliza (% de cemento)
Control	100	0	100	0	100	0	0	0
100 % RS	80	20	0	100	100	0	1	20
10 % QD + 90 % RS	80	20	0	100	90	10	1	20
30 % QD + 70 % RS	80	20	0	100	70	30	1	20
50 % QD + 50 % RS	80	20	0	100	50	50	1	20

ción de una compactación de 25 veces con los topes de varilla para cada capa. A continuación, se quitó el cono sin movimientos laterales ni torsionales, de tal manera que la altura de hundimiento se midió inmediatamente después de retirarlo. Además, la densidad fresca se midió pesando el espécimen en un cubo después de 15 minutos de compactación en 3 capas de mezcla, de acuerdo con ASTM C172 [65]. La densidad en seco se determinó pesando la muestra a la edad de ensayo del hormigón de 28 días.

2.3.2 Prueba de resistencia

La resistencia a la compresión se determinó de acuerdo con ASTM C140 [66], a una edad de hormigón de 7, 14, 21 y 28 días, para especímenes preparados con un cubo de 100 mm, como se muestra en la Figura 3. Se prepararon 3 especímenes para cada una de las edades de hormigón con una tasa de carga de 0,4 MPa/min. Para la resistencia a la tracción del hormigón, se realizó la prueba de tracción de división de acuerdo con las especificaciones del código de ASTM C496 [67]. Con este fin, se ensayaron 3 especímenes cilíndricos para cada una de las edades del hormigón, con dimensiones de 200 mm de altura y 100 mm de diámetro, bajo una tasa de carga de 1,0 MPa/min. Además, se realizó una prueba de resistencia a la flexión para todas las mezclas de acuerdo con lo indi-

cado en ASTM C78 [68], a una edad del hormigón de 28 días utilizando 3 especímenes preparados.

2.3.3 Ensayos de eflorescencia y absorción de agua

Las pruebas de eflorescencia y absorción de agua se realizaron a una edad de curado del hormigón de 28 días de acuerdo con las especificaciones de ASTM [66,69]. Solo se preparó un espécimen para las edades de curado del hormigón de 7 y 28 días. Los ladrillos (con un tamaño de 215 x 100 x 65 mm) se colocaron con sus caras de cabecera hacia el suelo en agua destilada durante 7 días tras finalizar la sesión de curado de 28 días, como se muestra en la Figura 4. Posteriormente, después de 7 días de inmersión, los ladrillos se calentaron a 110 °C durante 24 horas. Luego, se colocaron a 3 m del observador para buscar signos de eflorescencia en cualquier cara del ladrillo. También se buscó cualquier residuo blanco en el tanque de agua destilada, es decir, buscando signos de eflorescencia o precipitación de sal mineral dentro de la matriz de hormigón. Para la prueba de absorción de agua, los especímenes se secaron en un horno a 110 °C durante 24 horas y luego se sumergieron en agua. Se midieron los pesos en seco y en húmedo para cuantificar la absorción de agua.

Figura 3. Disposición de las pruebas de: a. compresión, b. división de la tracción y c. flexión

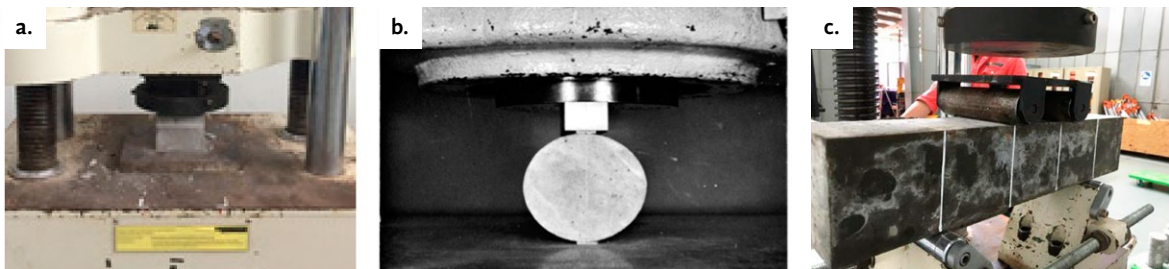


Figura 4. Inmersión para prueba de eflorescencia



3. Resultados y discusión

A partir de la Fase 1 se determinó el superplastificante óptimo al 1 % del peso del cemento con una relación agua-cemento de 0,45. Esto se aplicó luego en la investigación de la Fase 2 para varios reemplazos de agregados finos con diferentes proporciones de QD. Las propiedades de las mezclas de diseño en la Fase 2 se discuten en detalle en las siguientes secciones.

3.1 Densidades y propiedades de hundimiento

Como se muestra en la Tabla 5, las densidades de 100 % de RS son un 25,7 % y un 29,6 % más ligeras que las mezclas de hormigón convencionales para las densidades fresca y seca, respectivamente. Las diferencias se deben al reemplazo del contenido de POFA de 20 % del peso del cemento. Las diversas sustituciones con QD no muestran ninguna significación en las densidades frescas o secadas al horno, con solo una ligera disminución de las densidades para contenidos de sustitución más altos. En comparación con el hormigón convencional, la reducción más alta calculada en la carga muerta total proveniente del material de construcción es del 35,0 %. Esto eventualmente ayuda a reducir el costo de transporte del material y también a satisfacer las necesidades de dimensión de los miembros de soporte. En el contexto del desempeño, casi todas las mezclas alcanzan más de 17 MPa a los 28 días de la resistencia característica del hormigón. Se considera que la trabajabilidad de

todos los especímenes tiene un alto valor de asentamiento, ya que el intervalo es de 209 a 231 mm.

3.2 Propiedades mecánicas

3.2.1 Resistencia a la compresión

Con base en los resultados de la Tabla 6, las resistencias a la compresión obtenidas se pueden categorizar como concreto estructural, de acuerdo con la especificación del código ACI de 17 MPa para especímenes de tamaño de cubo y ladrillo. Todos los especímenes muestran una tendencia creciente habitual en la resistencia después del aumento en el tiempo de curado. Adicionalmente, el modo de fallo típico correspondiente se muestra en la Figura 5. La Tabla 5 también muestra que el incremento de reemplazo de polvo de cantera no causa ningún efecto sobre la ganancia de resistencia a lo largo de las edades de curado.

A partir de la observación del ensayo, debido a la baja gravedad específica del OPS, las mezclas de diseño mostraron tendencia a segregarse, afectando potencialmente su resistencia a la compresión [70]. En comparación con las mezclas similares anteriores [71], el hallazgo actual mostró una mejor resistencia con la inclusión de polvo de piedra caliza. Los efectos de relleno del polvo de piedra caliza provocaron que la reacción de hidratación tuviera lugar a una exposición óptima del cemento con agua añadida, promoviendo así el desarrollo de la resistencia [72]. Además, se formó ettringita al aplicar piedra caliza en la matriz de hormigón, lo que hace que sea más duradero [73].

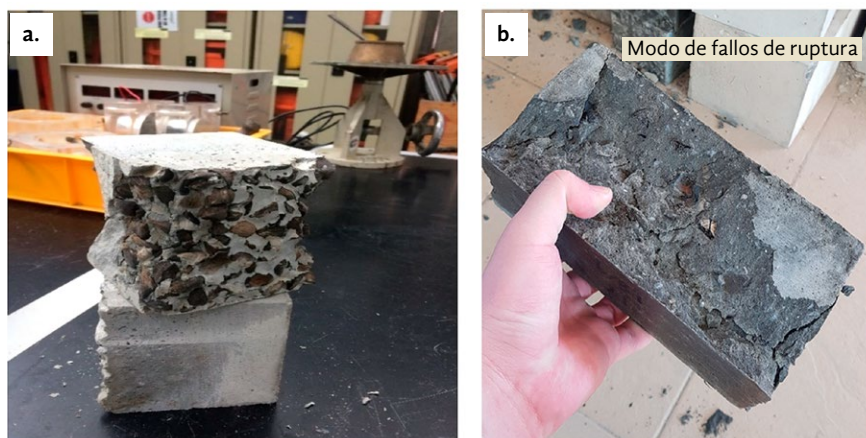
Tabla 5. Resultados de asentamiento y mediciones de densidad para la mezcla de diseño.

Espécimen de hormigón	Densidad en fresco kg/m ³	Hundimiento (mm)	Característica del hundimiento	Densidad con secado al horno kg/m ³	Índice de desempeño, MPa en una Unidad de densidad
100 % RS	1.864	231	Hundimiento total	1.653	20,99
10 % QD + 90 % RS	1.840	228	Hundimiento total	1.622	21,58
30 % QD + 70 % RS	1.837	217	Hundimiento total	1.617	22,11
50 % QD + 50 % RS	1.821	209	Hundimiento total	1.587	17,33
Control	2.343	107	Hundimiento real	2.143	25,28

Tabla 6. Resistencia a diferentes edades del hormigón.

Especimen	Resistencia a la compresión (MPa)							
	Cubo				Ladrillo			
	7 días	14 días	21 días	28 días	7 días	14 días	21 días	28 días
100 % RS	22,25	29,13	33,83	34,70	21,80	31,10	34,15	34,76
10 % QD + 90 % RS	22,25	26,42	33,00	35,00	26,22	38,41	39,63	43,60
30 % QD + 70 % RS	25,20	29,33	33,33	35,75	25,13	26,83	29,88	47,56
50 % QD + 50 % RS	21,54	22,71	25,17	27,50	28,66	33,54	38,72	45,73
Control	39,24	40,45	44,55	54,17	56,71	57,32	76,83	77,44

Figura 5. Modos de falla típicos de las mezclas de diseño para: a. muestras de cubo y b. de ladrillo



La Tabla 6 muestra que el crecimiento de la resistencia a la compresión hasta una edad del hormigón de 28 días para 30 % QD + 70 % RS es del 29,8 % y de solo 27,5 % para el espécimen de control. La incorporación de POFA promueve el desarrollo de resistencia a una edad de hormigón posterior con reacción puzolánica, adicional porque la actividad puzolánica puede consumir el hidróxido de calcio en la zona de transición interfacial (ITZ) para mejorar la unión del hormigón con los agregados. El hidróxido de calcio suele residir en la zona de unión entre el hormigón y los agregados [74]. Además, los compuestos de hidróxido suelen necesitar más tiempo para formar geles C-S-H y C-A-H, lo que promueve la resistencia posterior. Estas reacciones coinciden con la adición de POFA en la matriz de hormigón debido a su composición mineral y propiedades puzolánicas [40,75]. El SiO_2 en la POFA puede reaccionar con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$

de la hidratación del cemento para producir enlaces C-S-H adicionales [76].

3.2.2 Resistencia a la tracción de división

La Tabla 7 resume que solo 30 % de QD + 70 % de RS logra el requisito estructural de la especificación de 2 MPa a partir de los resultados de laboratorio. La resistencia a la tracción por división muestra la misma tendencia de mejora que la representada por la resistencia a la compresión, donde el aumento en la resistencia a la compresión ofrece un efecto positivo en la resistencia a la tracción. Hubo varias ecuaciones publicadas utilizadas para la correlación de la tracción de división basada en la resistencia a la compresión del hormigón a una edad específica. Estas incluyen la Ecuación 1 [39] para la OPC como reemplazo para agregado grueso, la Ecuación 2 para mezclas de hormigón convencionales [77], la Ecuación 3 para hormigón ligero con densida-

des entre 1.600 y 1.860 kg/m³ [78] y la Ecuación 4 para cenizas volantes como reemplazo de cemento [79]. Haciendo una comparación con la Tabla 6, se observa que la Ecuación 3 muestra el resultado más idéntico con el del real, tal como se recogió de la prueba de laboratorio. La Tabla 7, muestra que es posible utilizar las Ecuaciones 3 y 4 para predecir la resistencia a la tracción empírica de OPS y hormigón de arcilla expandida.

$$f_t = 0,4887\sqrt{f_{cu}}$$
Ecuación 1

$$f_t = 0,2f_{cy}^{0,7}$$
Ecuación 2

$$f_t = 0,297\sqrt{f_{cy}}$$
Ecuación 3

$$f_t = 0,58\sqrt{f_{cy}}$$
Ecuación 4

donde f_t es la resistencia a la tracción de división, f_{cu} es la resistencia a la compresión característica, f_{cy} es la resistencia a la compresión (no se especifica la edad del hormigón).

3.2.3 Resistencia a la flexión

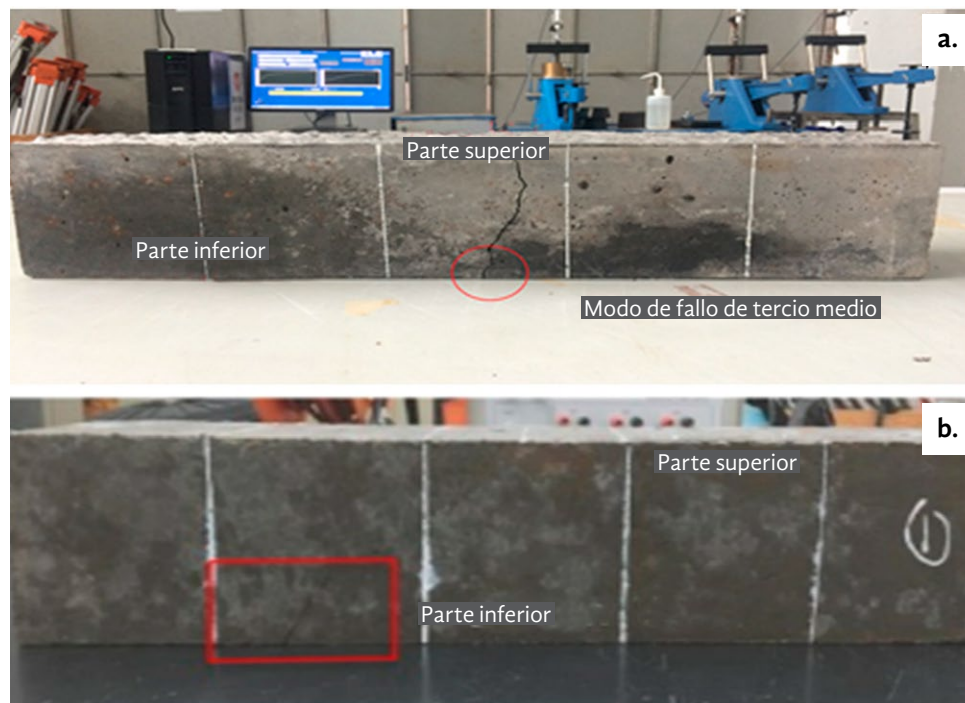
Como se observa en la Tabla 7, los resultados de la prueba de flexión de 3 puntos también muestran una tendencia de mejora similar a la de las resistencias a la compresión y a la tracción. La Tabla 6 muestra el fallo típico, que se inicia por agrietamiento. La resistencia a la flexión aumentó cuando la sustitución de arena con la proporción de polvo de cantera aumentó hasta un 30 %. Cuando el polvo de la cantera alcanzó 50 %, la resistencia a la flexión tendió a comportarse de manera adversa en comparación con aquellos con menor reemplazo. Esta observación coincide con la de una investigación anterior, que mostró que 40 % del reemplazo de arena por QD era la mezcla de diseño óptima [80].

Existen varias ecuaciones para estimar la resistencia a la flexión, incluida la Ecuación 5 para hormigones OPS y las Ecuaciones 6-8 para hormigones ligeros:

Tabla 7. Resistencia a la tracción de división y resistencia a la flexión para especímenes de hormigón con diferentes periodos de curado.

Especímen	Resistencia a la tracción de división (MPa)					Resistencia a la flexión (Mpa)				
	Actual	Ecuación (1)	Ecuación (2)	Ecuación (3)	Ecuación (4)	Actual	Ecuación (5)	Ecuación (6)	Ecuación (7)	Ecuación (8)
100 % RS	1,814	2,881	2,397	1,751	1,419	3,236	3,195	3,080	4,899	3,419
10 % QD + 90 % RS	1,979	3,227	2,810	1,961	2,830	3,512	3,716	3,450	5,698	3,830
30 % QD + 70 % RS	2,067	3,370	2,986	2,048	3,000	4,322	3,938	3,603	6,038	4,000
50 % QD + 50 % RS	1,895	3,305	2,905	2,008	2,922	2,761	3,836	3,533	5,883	3,922
Control	3,423	4,301	4,201	2,613	4,104	5,501	5,450	4,598	8,357	5,104
Valor p de dos colas Prueba t pareada con un nivel de confianza del 95 %	-	0,0002	0,0003	0,3895	0,0757	-	0,5510	0,5077	0,0014	0,5373
t	-	12,5696	11,4369	0,9643	2,3833	-	0,6502	0,7266	7,8173	0,6740
df	-	4	4	4	4	-	4	4	4	4
Error estándar de diferencia	-	0,094	0,072	0,165	0,260	-	0,247	0,294	0,295	0,280
Diferencia	-	Estadísticamente significativa	Estadísticamente significativa	No estadísticamente significativa	No estadísticamente significativa	-	No estadísticamente significativa	No estadísticamente significativa	Estadísticamente significativa	No estadísticamente significativa

Figura 6. Fallo típico de la prueba de flexión: a. dentro de la región central y b. fuera de la región central.



$$f_r = 0,3\sqrt[3]{f_{cu}^2} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$f_r = 0,5255\sqrt{f_{cu}} \quad \text{Ecuación 6}$$

$$f_r = 0,46\sqrt[3]{f_{cu}^2} \quad \text{Ecuación 7}$$

$$f_r = 0,58\sqrt{f_{cu}} \quad \text{Ecuación 8}$$

donde f_r es la resistencia a la flexión, f_{cu} es la resistencia a la compresión característica.

La Tabla 7 muestra que es posible utilizar las Ecuaciones 5 y 8 para predecir la resistencia a la tracción empírica de OPS y el hormigón de arcilla expandida. Sin embargo, la Ecuación 5 demuestra los valores de predicción más idénticos en los casos de reemplazo completo de arena con especímenes de QD y de control. No hay solamente una ecuación que prediga bien la resistencia a la flexión de todas las mezclas de diseño propuestas. Por lo tanto, se debe establecer una correlación adicional para una predicción de fuerza más precisa en ausencia de resultados de laboratorio.

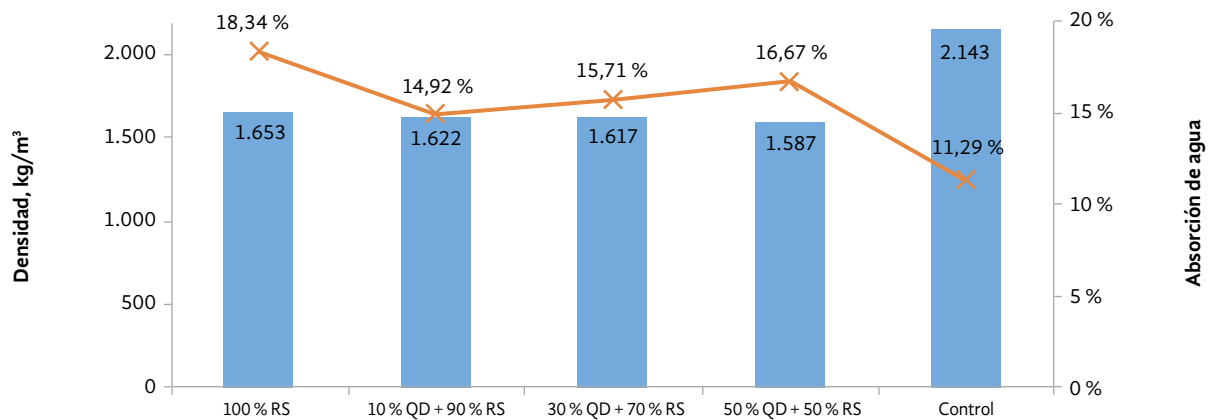
3.2.4 Absorción de agua

La Figura 7 muestra que la adición de OPS y más contenido de QD mejora la capacidad de absorción de agua de la mezcla. De acuerdo con una investigación previa [81], el OPS puede absorber un 36 % más de agua que el hormigón de grava convencional [81]. Se encontró una menor absorción de agua en la investigación actual ya que los OPS se empaparon previamente antes de mezclarse con el hormigón, lo que dio como resultado una menor tendencia a la absorción de agua.

3.2.5 Prueba de eflorescencia

Todos los especímenes presentaban eflorescencias en las que se apreciaba una capa de precipitación de sales minerales en sus superficies sumergidas, como se muestra en la Figura 8. El tipo principal de sal formada en las muestras fue carbonato de calcio, que provino del Ca(OH)_2 sin reaccionar de la hidratación. El

Figura 7. Absorción de agua de la mezcla de diseño



Ca(OH)_2 se transportó a la capa de agua destilada de 25 mm a medida que el contenido de sal era menor en el agua destilada. Después del proceso de inmersión, las muestras se sacaron y se secaron, y allí se produjo la precipitación al entrar en contacto con el Ca(OH)_2 para formar CaCO_3 .

Figura 8. Capa de deposición de carbonato de calcio sobre el espécimen



Los especímenes con polvo de piedra caliza pueden causar precipitación adicional debido a la reacción de Ca(OH)_2 en la matriz de hormigón con las puzolanas (POFA) para formar geles de C-S-H y, por lo tanto, aumentar la densidad del hormigón mientras se empuja el exceso de CaCO_3 insoluble a través de los capilares del mismo. Como los especímenes con polvo de piedra caliza experimentaron dos fases

de precipitación, se justifica que la visibilidad de la eflorescencia fue más obvia en comparación con el espécimen de control.

3.3 Efectos de la contracción por secado

La contracción por secado es uno de los problemas más comunes en la industria del hormigón, atribuidos a sus efectos degradantes sobre la resistencia del hormigón. Esta puede ser causada por el tipo de agregado utilizado, la rigidez del hormigón, la relación agua-cemento, el método de curado, el entorno, entre otros. De acuerdo con [82], el hormigón de peso normal tiene una contracción por secado más baja que el hormigón de peso ligero. Esto se debe principalmente a las propiedades y cantidades de agregado [83]. La OPS tiende a tener una mayor tasa de absorción de agua que la grava convencional en la matriz de hormigón [84]. La superficie lisa de OPS, con un área de superficie específica más baja en comparación con la grava, contribuye a la mayor contracción por secado [85]. Una relación agua-cemento más baja puede minimizar la contracción por secado, ya que tiene una baja posibilidad de evaporación excesiva del agua [86]. A su vez, la minimización de la contracción por secado puede promover la resistencia del hormigón.

Una mayor sustitución del polvo de cantera requiere una mayor cantidad de agua para que la mezcla de hormigón sea viable, ya que este tiene una alta

afinidad por el agua, creando un mayor escenario de succión de humedad dentro de la matriz de hormigón y, por lo tanto, la aparición de contracción por secado. Esto se puede resolver humedeciendo previamente el polvo de la cantera antes de usarlo para fines de fundición [53]. Además, la arena puede ayudar a reducir la contracción por secado debido a sus propiedades de relleno en la prevención de la formación de burbujas de agua dentro de la matriz de hormigón [87]. Las ilustraciones ampliadas de POFA fresco y conectado a tierra se muestran en la Figura 9. La POFA molida es capaz de deslizarse en los huecos entre los agregados gruesos y sufrir reacciones puzolánicas [87]. Además, estas reacciones son capaces de reducir las burbujas de agua en las matrices de hormigón y, por lo tanto, reducir la contracción por secado, lo que resulta en un producto de hormigón más denso y sólido.

3.4 Efectos del agregado secado con superficie saturada

Los agregados prehumedecidos o agregados saturados secados en la superficie son los métodos utilizados para saturar los poros internos de los agregados antes del fraguado. El proceso se ejecuta remojando los agregados durante 24 horas antes de secarlos al sol o de cualquier manera apropiada para lograr una superficie seca, como lo sugiere [47]. Esta actividad se propone para evitar la alternancia del contenido de agua diseñado de las mezclas. La hidratación

completa puede no ocurrir si el agua es consumida y atraída por los agregados. Entre los agregados secados al sol, los secados al aire y los saturados secados en la superficie, la inserción de agregados saturados secados en la superficie puede producir hormigón con las mejores propiedades mecánicas [88].

3.5 Especificaciones del código

De acuerdo con los estándares de Malasia, ninguna de las mezclas consideradas en el estudio actual cumple con las especificaciones de los bloques de ingeniería. Sin embargo, están dentro del límite de las clases de ladrillo de carga 1 a 4. Para los estándares de Singapur, estas mezclas cumplen con las especificaciones para ladrillos comunes de grado 2 y 3. Generalmente, las mezclas de diseño propuestas solo se recomiendan para condiciones climáticas moderadas, pero no severas. Esto se debe al problema de la absorción de agua. La absorción de agua del entorno circundante es otro indicador de rendimiento importante, ya que esta propiedad también puede reflejar la absorción de productos químicos del exterior del edificio al interior, poniendo así en peligro a sus ocupantes. Con el fin de abordar esta preocupación, se sugiere aplicar una capa impermeable de recubrimiento para evitar que el hormigón absorba agua del entorno circundante. Para una comparación general, la Tabla 8 enumera los cumplimientos de las mezclas de diseño propuestas con varios códigos de práctica existentes.

Figura 9. Microscopía Electrónica de Barrido de POFA: a. fresco y b. molido [87]

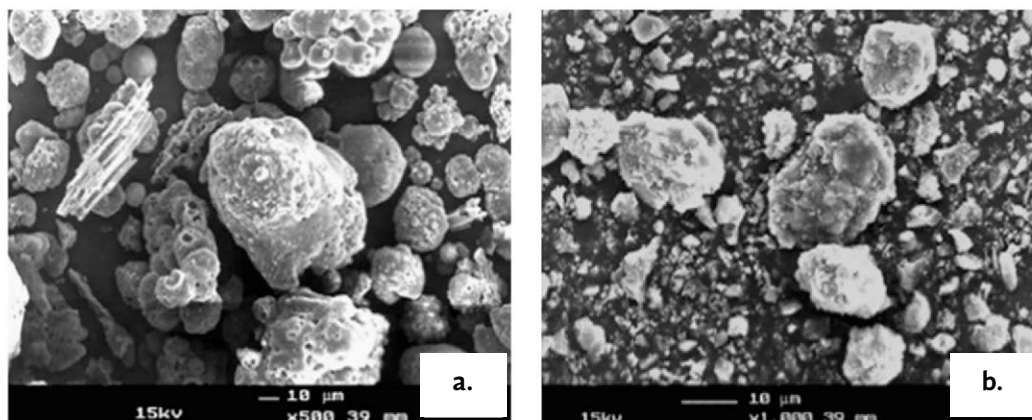


Tabla 8. Cumplimiento con códigos para la mezcla de diseño.

Espec.	Código	Clase	Resistencia a la compresión (Mpa)	Absorción de agua (%)	Cumplimiento			
					100 % RS	10 % QD + 90 % RS	30 % QD + 70 % RS	50 % QD + 50 % RS
Bloque de ingeniería	Normas malasias 7.6:1972	A	69,0	4,5	x	x	x	x
		B	48,5	7,0	x	x	x	x
Bloque de carga	Normas malasias 7.6:1972	15	103,50	-	x	x	x	x
		10	69,0	-	x	x	x	x
		7	48,5	-	x	x	x	x
		5	34,5	-	✓	✓	✓	x
		4	27,5	-	✓	✓	✓	✓
		3	20,5	-	✓	✓	✓	✓
		2	14,0	-	✓	✓	✓	✓
		1	7,0	-	✓	✓	✓	✓
Ladrillo a prueba de humedad	Normas malasias 7.6:1972	DPC	7,0	4,5	x	x	x	x
Ladrillo de fachada/ordinario	Normas de Singapur 103:1974	1 ^{er} grado	35,0	25,0	x	✓	✓	x
		2 ^{do} grado	20,0	25,0	✓	✓	✓	✓
		3 ^{er} grado	5,2	25,0	✓	✓	✓	✓
Ladrillo de construcción	ASTM C62M	SW	20,7	17,0	x	✓	✓	✓
		MW	17,2	22,0	✓	✓	✓	✓
Ladrillo de fachada	ASTM C216M	SW	20,7	17,0	✓	✓	✓	✓
		MW	17,2	22,0	✓	✓	✓	✓
Ladrillo peatonal para pavimento de tráfico	ASTM C902M	SW	55,2	8,0	x	x	x	x
		MW	20,7	14,0	x	x	x	x
Mampostería de carga	ASTM C90M	SW	20,7	17,0	x	✓	✓	✓
		MW	13,1	17,0	x	✓	✓	✓

SW – Clima severo, MW – Clima moderado, x – no, ✓ – sí

3.6 Análisis de costo

El costo preliminar de fabricar un ladrillo se calculó y comparó con el ladrillo C-CPo ordinario. La Tabla 9 muestra el costo de fabricación de ladrillos con la mezcla propuesta de 30 % de QD + 70 % de RS. El cálculo se basa en un solo ladrillo con las siguientes dimensiones: altura de $65 \pm 1,875$ mm, ancho de $102,5 \pm 1,875$ mm y longitud de 215 ± 3 mm. En general, el costo de fabricar un solo ladrillo reutilizado es menor que el de un ladrillo de cemento convencional. Además, las propiedades beneficiosas para cada tipo de ladrillo se incluyen como referencia.

Dependiendo de las especificaciones del código, las mezclas de diseño investigadas sirven para una amplia gama de aplicaciones para ladrillos de cemento, como se muestra en la Tabla 8, desde los que no soportan carga hasta ladrillos de carga. Mediante el uso de residuos industriales locales incorporados en la matriz de ladrillo, se promueve un contexto sostenible en la industria de la construcción. Aunque este ladrillo de cemento ecológico tiene menor resistencia, es capaz de lograr un uso estructural de acuerdo con las especificaciones de los códigos. Sus altas propiedades de absorción de agua se pueden resolver incluyendo una cubierta impermeable en la superficie

Tabla 9. Cálculo de costos de un solo ladrillo propuesto.

	Materiales	Precio (USD)	Beneficio
Ladrillo C-CPo	Cemento	0,21	• Más fuerte que los ladrillos con residuos agroindustriales incorporados • Menos tiempo de preparación • Materiales altamente disponibles
	Grava	0,01	
	Arena	0,01	
	Agua	0,00	
	Costo de mano de obra	0,05	
	Total	0,28	
Ladrillo de residuos agroindustriales propuesto	Cemento	0,09	• Se requiere menos polvo de cemento para la mezcla, ya que se reemplaza parcialmente por POFA • Los materiales utilizados son más sostenibles, pues se incorporan residuos agroindustriales a la mezcla • Menor huella de carbono para producir un ladrillo de hormigón • Menor peso, haciendo que sea más fácil transportarlo
	POFA	Residuo	
	Arena	0,01	
	QD	0,00	
	Superplastificante	0,01	
	Agua	0,00	
	Costo de la mano de obra	0,05	
	OPS	Residuo	
	Total	0,16	

del hormigón. Como un ladrillo de cemento de baja densidad, también se reduce el consumo de energía a través de una baja transferencia de calor desde el entorno exterior al interior [30,89], con un costo de fabricación más bajo, y debería tener una buena propiedad de insonorización debido a la baja densidad del hormigón.

4. Conclusiones

Este estudio se dedicó al análisis de las propiedades mecánicas y físicas de la mezcla de hormigón con reemplazo completo de agregado grueso con OPS, 20 % de reemplazo de cemento con POFA y diferentes reemplazos de agregado fino con QD como mezclas de diseño. Del estudio pueden extraerse varias conclusiones:

- Todas las mezclas de diseño en la segunda fase cumplieron con la resistencia a la compresión estructural mínima de 17 MPa, mientras que solo el 30 % de QD + 70 % de RS logró la resistencia a la división por tracción mínima de 2 MPa para un requisito estructural. La resistencia a la compresión se ha mejorado en comparación con las de [29].

- Las absorciones de agua de todos los especímenes estuvieron entre 14,9 % y 18,3 %, con densidades menores a 1.700 kg/m³. Todas las mezclas de diseño eflorescieron donde se encontró una capa de precipitación de sal mineral dentro de las muestras.
- Se encontró que la POFA molida es capaz de deslizarse en los huecos entre los áridos gruesos y sufrir reacciones puzolánicas. Además, estas reacciones son capaces de reducir las burbujas de agua en las matrices de hormigón y, por lo tanto, reducir la contracción por secado, lo que resulta en un producto de hormigón más denso y sólido.
- Todas las mezclas de diseño cumplieron con las especificaciones de Malasia (ladrillo de carga de las clases 1 a 4), Singapur (ladrillo común de los grados 2 y 3) y ASTM (ladrillos de construcción y revestimiento en condiciones climáticas moderadas).
- Se reveló que los especímenes con polvo de piedra caliza han experimentado dos fases de precipitación. Esto justificó que la visibilidad de la eflorescencia fuera más evidente en comparación con el espécimen de control.

- Se encontró que el costo de fabricar un solo ladrillo es casi equivalente al de un ladrillo de cemento convencional.

Por lo tanto, el ladrillo de cemento ecológico propuesto muestra una buena viabilidad para ser empleado en la industria de la construcción para la promoción de la sostenibilidad de los materiales y mejorar la gestión de los residuos. También se recomienda realizar un programa de pruebas más completo para evaluar el uso potencial de los nuevos ladrillos, como el cambio de longitud y las propiedades de aislamiento térmico y sonoro.

Aportes de los autores: conceptualización, W. Q. C. y Y. H. L.; curaduría de datos, W. Q. C., Y. H. L., M. A., R. F., N. V., A. B. H. K. y Y. Y. L.; análisis formal, W. Q. C., Y. H. L., M. A., R. F., N. V., A. B. H. K. y Y. Y. L.; adquisición de fondos, M. A., R. F. y N. V.; investigación, W. Q. C. y Y. H. L.; metodología, W. Q. C., Y. H. L. y A. B. H. K.; recursos, M. A., R. F., N. V. y Y. Y. L.; *software*, A. B. H. K. y Y. Y. L.; supervisión, Y. H. L.; validación, M. A., R. F., N. V., A. B. H. K. y Y. Y. L.; visualización, M. A. y A. B. H. K.; escritura-borrador original, W. Q. C. y Y. H. L.; escritura-revisión y edición, M. A., R. F., N. V., A. B. H. K. y Y. Y. L. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Financiación: la investigación está parcialmente financiada por el Ministerio de Ciencia y Educación Superior de la Federación Rusa como parte del programa del Centro de Investigación de Clase Mundial: Tecnologías Digitales Avanzadas (contrato N ° 075-15-2020-934 de fecha 17 de noviembre de 2020).

Declaración de la Junta de Revisión Institucional: no aplica.

Declaración de consentimiento informado: no aplica.

Declaración de disponibilidad de datos: el intercambio de datos no se aplica.

Reconocimientos: Los autores agradecen el apoyo financiero brindado por el Departamento de Ingeniería Civil y de la Construcción, facultad de Ingeniería y Ciencia, Universidad de Curtin, Malasia y el Decanato de Investigación Científica en la Universidad Prince Sattam bin Abdulaziz, Alkharj, Arabia Saudita, y la colaboración del Departamento de Ingeniería Civil, facultad de Ingeniería e Informática, Universidad de Amran, Yemen, y el Departamento de Ingeniería Civil y de la Construcción, Universidad de Curtin, Malasia, para esta investigación.

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

Referencias

1. Herbert, T. Brick: A world history. Choice Rev. Online 2004, 41, 3863. [CrossRef]
2. Zhang, L. Production of bricks from waste materials-A review. Constr. Build. Mater. 2013, 47, 643-655. [CrossRef]
3. Makul, N.; Fediuk, R.; Amran, H. M. M.; Zeyad, A. M.; de Azevedo, A. R. G.; Klyuev, S.; Vatin, N.; Karelina, M. Capacity to develop recycled aggregate concrete in South East Asia. Buildings 2021, 11, 234. [CrossRef]
4. Sebastián, E.; Cultrone, G. Technology of rammed-earth constructions ("Tapial") in Andalusia (Spain): Their restoration and conservation. En Materials, Technologies and Practice in Historic Heritage Structures; Dan, M. B., Pr'ikry, R., Török, Á., Eds.; Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2010; pp. 11-28. ISBN 978-90-481-2684-2.

5. Balaguera, A.; Carvajal, G. I.; Albertí, J.; Fullana-i-Palmer, P. Life cycle assessment of road construction alternative materials: A literature review. *Resour. Conserv. Recycl.* 2018, 132, 37-48. [CrossRef]
6. Murmu, A. L.; Patel, A. Towards sustainable bricks production: An overview. *Constr. Build. Mater.* 2018, 165, 112-125. [CrossRef]
7. Mohd Hasan, M. R.; Chew, J. W.; Jamshidi, A.; Yang, X.; Hamzah, M. O. Review of sustainability, pretreatment, and engineering considerations of asphalt modifiers from the industrial solid wastes. *J. Traffic Transp. Eng.* 2019, 6, 209-244. [CrossRef]
8. Jong, L. Y.; Teo, D. C. L. Concrete containing palm oil fuel ash (POFA) and oil palm shell (OPS) subjected to elevated temperatures. *J. Civ. Eng. Sci. Technol.* 2014, 5, 13-17. [CrossRef]
9. Amran, M.; Fediuk, R.; Murali, G.; Vatin, N.; Karelina, M.; Ozbakkaloglu, T.; Krishna, R. S.; Kumar, A. S.; Kumar, D. S.; Mishra, J. Rice husk ash-based concrete composites: A critical review of their properties and applications. *Crystals* 2021, 11, 168. [CrossRef]
10. Avudaiappan, S.; Prakatanoju, S.; Amran, M.; Aepuru, R.; Saavedra Flores, E. I.; Das, R.; Gupta, R.; Fediuk, R.; Vatin, N. Experimental investigation and image processing to predict the properties of concrete with the addition of nano silica and rice husk ash. *Crystals* 2021, 11, 1230. [CrossRef]
11. Chiang, K. Y.; Chou, P. H.; Hua, C. R.; Chien, K. L.; Cheeseman, C. Lightweight bricks manufactured from water treatment sludge and rice husks. *J. Hazard. Mater.* 2009, 171, 76-82. [CrossRef]
12. Juel, M. A. I.; Mizan, A.; Ahmed, T. Sustainable use of tannery sludge in brick manufacturing in Bangladesh. *Waste Manag.* 2017, 60, 259-269. [CrossRef] [PubMed]
13. Kinuthia, J. M.; Nidzam, R. M. Towards zero industrial waste: Utilisation of brick dust waste in sustainable construction. *Waste Manag.* 2011, 31, 1867-1878. [CrossRef] [PubMed]
14. Ng, W. P. Q.; Lam, H. L.; Ng, F. Y.; Kamal, M.; Lim, J. H. E. Waste-to-wealth: Green potential from palm biomass in Malaysia. *J. Clean. Prod.* 2012, 34, 57-65. [CrossRef]
15. Asensio, E.; Medina, C.; Frías, M.; de Rojas, M. I. S. Characterization of ceramic-based construction and demolition waste: Use as pozzolan in cements. *J. Am. Ceram. Soc.* 2016, 99, 4121-4127. [CrossRef]
16. Muñoz, V. P.; Morales, O. M. P.; Letelier, G. V.; MENDÍVIL, G. M. A. Fired clay bricks made by adding wastes: Assessment of the impact on physical, mechanical and thermal properties. *Constr. Build. Mater.* 2016, 125, 241-252. [CrossRef]
17. De Lasso, J.; França, J.; Espírito Santo, K.; Haddad, A. Case study: LCA methodology applied to materials management in a Brazilian residential construction site. *J. Eng.* 2016, 2016, 8513293. [CrossRef]
18. Kaza, S.; Yao, L. C.; Bhada-Tata, P.; Van Woerden, F. What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050; World Bank Publications: Washington, D. C., EE. UU., 2018.

19. Arrigoni, A.; Grillet, A. C.; Pelosato, R.; Dotelli, G.; Beckett, C. T. S.; Woloszyn, M.; Ciano, D. Reduction of rammed earth's hygroscopic performance under stabilisation: An experimental investigation. *Build. Environ.* 2017, 115, 358-367. [CrossRef]
20. Sekhar, D. C.; Nayak, S. Utilization of granulated blast furnace slag and cement in the manufacture of compressed stabilized earth blocks. *Constr. Build. Mater.* 2018, 166, 531-536. [CrossRef]
21. Da Cardoso, A. C. F.; Galatto, S. L.; Guadagnin, M. R. Estimativa de geração de resíduos da construção civil e estudo de viabilidade de usina de triagem e reciclagem. *Rev. Bras. Ciênc. Ambient.* 2014, 31, 1-10.
22. Rodseth, C.; Notten, P.; von Blottnitz, H. A revised approach for estimating informally disposed domestic waste in rural versus urban South Africa and implications for waste management. *S. Afr. J. Sci.* 2020, 116, 1-6. [CrossRef]
23. Kadir, A. A.; Mohajerani, A. Bricks: An excellent building material for recycling wastes-A review. En Proceedings of the IASTED International Conference on Environmental Management and Engineering (EME 2011), Calgary, AB, Canada, 4-6 July 2011; pp. 108-115.
24. Al-Fakih, A.; Mohammed, B. S.; Wahab, M. M. A.; Liew, M. S.; Mugahed Amran, Y. H.; Alyousef, R.; Alabduljabbar, H. Characteristic compressive strength correlation of rubberized concrete interlocking masonry wall. *Structures* 2020, 26, 169-184. [CrossRef]
25. Lesovik, V.; Volodchenko, A.; Fediuk, R.; Mugahed Amran, Y. H.; Timokhin, R. Enhancing performances of clay masonry materials based on nanosize mine waste. *Constr. Build. Mater.* 2021, 269, 121333. [CrossRef]
26. Al-Fakih, A.; Mohammed, B. S.; Wahab, M. M. A.; Liew, M. S.; Mugahed Amran, Y. H. Flexural behavior of rubberized concrete interlocking masonry walls under out-of-plane load. *Constr. Build. Mater.* 2020, 263, 120661. [CrossRef]
27. Buyle, M.; Braet, J.; Audenaert, A. Life cycle assessment in the construction sector: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2013, 26, 379-388. [CrossRef]
28. Smol, M.; Kulczycka, J.; Henclik, A.; Gorazda, K.; Wzorek, Z. The possible use of sewage sludge ash (SSA) in the construction industry as a way towards a circular economy. *J. Clean. Prod.* 2015, 95, 45-54. [CrossRef]
29. Raut, A. N.; Gomez, C. P. Development of thermally efficient fibre-based eco-friendly brick reusing locally available waste materials. *Constr. Build. Mater.* 2017, 133, 275-284. [CrossRef]
30. Lee, Y. H.; Amran, M.; Yong Lee, Y.; Hong Kueh, A. B.; Fui Kiew, S.; Fediuk, R.; Vatin, N.; Vasilev, Y. Thermal behavior and energy efficiency of modified concretes in the tropical climate: A systematic review. *Sustainability* 2021, 13, 11957. [CrossRef]

31. Tolstoy, A.; Lesovik, V.; Fediuk, R.; Amran, M.; Gunasekaran, M.; Vatin, N.; Vasilev, Y. Production of greener high-strength concrete using russian quartz sandstone mine waste aggregates. *Materials* 2020, 13, 5575. [CrossRef]
32. Da Silva, T. R.; de Azevedo, A. R. G.; Cecchin, D.; Marvila, M. T.; Amran, M.; Fediuk, R.; Vatin, N.; Karelina, M.; Klyuev, S.; Szelag, M. Application of plastic wastes in construction materials: A review using the concept of life-cycle assessment in the context of recent research for future perspectives. *Materials* 2021, 14, 3549. [CrossRef]
33. Lesovik, V.; Volodchenko, A.; Fediuk, R.; Mugahed Amran, Y. H. Improving the hardened properties of nonautoclaved silicate materials using nanodispersed mine waste. *J. Mater. Civ. Eng.* 2021, 33, 04021214. [CrossRef]
34. Petropavlovskii, K.; Novichenkova, T.; Petropavlovskaya, V.; Sulman, M.; Fediuk, R.; Amran, M. Faience waste for the production of wall products. *Materials* 2021, 14, 6677. [CrossRef] [PubMed]
35. De Carvalho Araújo, C. K.; Salvador, R.; Moro Piekarski, C.; Sokulski, C. C.; de Francisco, A. C.; de Carvalho Araújo Camargo, S. K. Circular economy practices on wood panels: A bibliographic analysis. *Sustainability* 2019, 11, 1057. [CrossRef]
36. Krishna, R. S.; Mishra, J.; Meher, S.; Das, S. K.; Mustakim, S. M.; Singh, S. K. Industrial solid waste management through sustainable green technology: Case study insights from steel and mining industry in Keonjhar, India. *Mater. Today Proc.* 2020, 33, 5243-5249. [CrossRef]
37. Ashour, T.; Korjenic, A.; Korjenic, S.; Wu, W. Thermal conductivity of unfired earth bricks reinforced by agricultural wastes with cement and gypsum. *Energy Build.* 2015, 104, 139-146. [CrossRef]
38. Yuan, X.; Tang, Y.; Li, Y.; Wang, Q.; Zuo, J.; Song, Z. Environmental and economic impacts assessment of concrete pavement brick and permeable brick production process-A case study in China. *J. Clean. Prod.* 2018, 171, 198-208. [CrossRef]
39. Shafigh, P.; Jumaat, M. Z.; Mahmud, H. B.; Hamid, N. A. A. Lightweight concrete made from crushed oil palm shell: Tensile strength and effect of initial curing on compressive strength. *Constr. Build. Mater.* 2012, 27, 252-258. [CrossRef]
40. Amran, M.; Murali, G.; Fediuk, R.; Vatin, N.; Vasilev, Y.; Abdelgader, H. Palm oil fuel ash-based eco-efficient concrete: A critical review of the short-term properties. *Materials* 2021, 14, 332. [CrossRef]
41. Mosaberpanah, M. A.; Amran, Y. H. M.; Akoush, A. Performance investigation of palm kernel shell ash in high strength concrete production. *Comput. Concr.* 2020, 26, 577-585. [CrossRef]
42. Al-Hokabi, A.; Hasan, M.; Amran, M.; Fediuk, R.; Vatin, N. I.; Klyuev, S. Improving the early properties of treated soft kaolin clay with palm oil fuel ash and gypsum. *Sustainability* 2021, 13, 910. [CrossRef]

43. Amran, M.; Lee, Y. H.; Fediuk, R.; Murali, G.; Mosaberpanah, M. A.; Ozbakkaloglu, T.; Lee, Y. Y.; Vatin, N.; Klyuev, S.; Karelia, M. Palm oil fuel ash-based eco-friendly concrete composite: A critical review of the long-term properties. *Materials* 2021, 14, 7074. [CrossRef]
44. Zeyad, A. M.; Johari, M. A. M.; Alharbi, Y. R.; Abadel, A. A.; Amran, Y. H. M.; Tayeh, B. A.; Abutaleb, A. Influence of steam curing regimes on the properties of ultrafine POFA-based high-strength green concrete. *J. Build. Eng.* 2021, 38, 102204. [CrossRef]
45. Teo, D. C. L.; Mannan, M. A.; Kurian, V. J. Structural concrete using oil palm shell (OPS) as lightweight aggregate. *Turk. J. Eng. Environ. Sci.* 2006, 30, 251-257.
46. Mannan, M. A.; Ganapathy, C. Engineering properties of concrete with oil palm shell as coarse aggregate. *Constr. Build. Mater.* 2002, 16, 29-34. [CrossRef]
47. Shafigh, P.; Jumaat, M. Z.; Mahmud, H. Oil palm shell as a lightweight aggregate for production high strength lightweight concrete. *Constr. Build. Mater.* 2011, 25, 1848-1853. [CrossRef]
48. Shafigh, P.; Johnson Alengaram, U.; Mahmud, H. B.; Jumaat, M. Z. Engineering properties of oil palm shell lightweight concrete containing fly ash. *Mater. Des.* 2013, 49, 613-621. [CrossRef]
49. Shafigh, P.; Jumaat, M. Z.; Mahmud, H. Mix design and mechanical properties of oil palm shell lightweight aggregate concrete: A review. *Int. J. Phys. Sci.* 2010, 5, 2127-2134.
50. Aslam, M.; Shafigh, P.; Jumaat, M. Z. Oil-palm by-products as lightweight aggregate in concrete mixture: A review. *J. Clean. Prod.* 2016, 126, 56-73. [CrossRef]
51. Zhao, Y.; Qiu, J.; Xing, J.; Sun, X. Recycling of quarry dust for supplementary cementitious materials in low carbon cement. *Constr. Build. Mater.* 2020, 237, 117608. [CrossRef]
52. Dhoka, M. M. C. Green concrete: Using industrial waste of marble powder, quarry dust and paper pulp. *Int. J. Eng. Sci. Invent.* 2013, 2, 67-70.
53. Lim, J. S.; Cheah, C. B.; Ramli, M. B. The setting behavior, mechanical properties and drying shrinkage of ternary blended concrete containing granite quarry dust and processed steel slag aggregate. *Constr. Build. Mater.* 2019, 215, 447-461. [CrossRef]
54. Irwan, J.M.; Othman, N.; Koh, H.B. Properties of sand cement brick containing quarry dust (SCBQD) and bacteria strain. *Int. J. Sustain. Constr. Eng. Technol.* 2020, 11, 13-22. [CrossRef]
55. Siddika, A.; Amin, M. R.; Rayhan, M. A.; Islam, M. S.; Mamun, M. A. A.; Alyousef, R.; Mugahed Amran, Y. H. Performance of sustainable green concrete incorporated with fly ash, rice husk ash, and stone dust. *Acta Polytech.* 2021, 61, 279-291. [CrossRef]
56. Saheed, S.; Amran, Y. H. M.; El-Zeadani, M.; Aziz, F. N. A.; Fediuk, R.; Alyousef, R.; Alabduljabbar, H. Structural behavior of out-of-plane loaded precast lightweight EPS-foam concrete C-shaped slabs. *J. Build. Eng.* 2021, 33, 101597. [CrossRef]

57. Saheed, S.; Aziz, F. N. A. A.; Amran, M.; Vatin, N.; Fediuk, R.; Ozbakkaloglu, T.; Murali, G.; Mosaberpanah, M. A. Structural performance of shear loaded precast EPS-foam concrete half-shaped slabs. *Sustainability* 2020, 12, 9679. [CrossRef]
58. Lim, S. K.; Tan, C. S.; Li, B.; Ling, T. C.; Hossain, M. U.; Poon, C. S. Utilizing high volumes quarry wastes in the production of lightweight foamed concrete. *Constr. Build. Mater.* 2017, 151, 441-448. [CrossRef]
59. Febin, G. K.; Abhirami, A.; Vineetha, A. K.; Manisha, V.; Ramkrishnan, R.; Sathyan, D.; Mini, K. M. Strength and durability properties of quarry dust powder incorporated concrete blocks. *Constr. Build. Mater.* 2019, 228, 116793. [CrossRef]
60. Ilangovana, R.; Mahendrana, N.; Nagamanib, K. Strength and durability properties of concrete containing quarry rock dust as fine aggregate. *J. Eng. Appl. Sci.* 2008, 3, 20-26.
61. Hamid Mir, A. Improved concrete properties using quarry dust as replacement for natural sand. *Int. J. Eng. Res. Dev.* 2015, 11, 46-52.
62. ASTM C330; Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete. ASTM International: West Conshohocken, PA, EE. UU., 2009. [CrossRef]
63. ASTM C33; Standard Specification for Concrete Aggregates. ASTM International: West Conshohocken, PA, EE. UU., 2010.
64. ASTM C143/C143M; Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete. ASTM International: West Conshohocken, PA, EE. UU., 2015.
65. ASTM C172/C172M-10; Standard Practice for Sampling Freshly Mixed Concrete. ASTM International: West Conshohocken, PA, EE. UU., 2010.
66. ASTM C140/C140M; Standard Test Methods for Sampling and Testing Concrete Masonry Units and Related Units 1. ASTM International: West Conshohocken, PA, EE. UU., 2020.
67. ASTM C496/C496M-17; Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens ASTM C-496. ASTM International: West Conshohocken, PA, EE. UU., 2011; ISBN 5919881100.
68. ASTM C78; Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete. ASTM International: West Conshohocken, PA, EE. UU., 2016.
69. Sanders, J. P.; Brosnan, D. A. Test method for determining the efflorescence potential of masonry materials based on soluble salt content. *J. ASTM Int.* 2010, 7, 102725. [CrossRef]
70. Singh, M.; Siddique, R. Effect of coal bottom ash as partial replacement of sand on properties of concrete. *Resour. Conserv. Recycl.* 2013, 72, 20-32. [CrossRef]
71. Amran, M.; Fediuk, R.; Abdelgader, H. S.; Murali, G.; Ozbakkaloglu, T.; Lee, Y. H.; Lee, Y. Y. Fiber-reinforced alkali-activated concrete: A review. *J. Build. Eng.* 2022, 45, 103638. [CrossRef]

72. Muthusamy, K.; Nur Azzimah, Z. Exploratory study of palm oil fuel ash as partial cement replacement in oil palm shell lightweight aggregate concrete. *Res. Appl. Sci. Eng. Technol.* 2014, 8, 150-152. [CrossRef]
73. Uysal, M.; Yilmaz, K. Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete. *Cem. Concr. Compos.* 2011, 33, 771-776. [CrossRef]
74. Wang, D.; Shi, C.; Farzadnia, N.; Shi, Z.; Jia, H.; Ou, Z. A review on use of limestone powder in cement-based materials: Mechanism, hydration and microstructures. *Constr. Build. Mater.* 2018, 181, 659-672. [CrossRef]
75. Sargent, P. The development of alkali-activated mixtures for soil stabilisation. En *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes*; Elsevier: Amsterdam, Países Bajos, 2015; ISBN 9781782422884.
76. Alyousef, R.; Mohammadhosseini, H.; Alrshoudi, F.; Tahir, M. M.; Alabduljabbar, H.; Mohamed, A. M. Enhanced performance of concrete composites comprising waste metalised polypropylene fibres exposed to aggressive environments. *Crystals* 2020, 10, 696. [CrossRef]
77. Topçu, I.B.; Uygunog'lu, T. Effect of aggregate type on properties of hardened self-consolidating lightweight concrete (SCLC). *Constr. Build. Mater.* 2010, 7, 1286-1295. [CrossRef]
78. Zhang, M. H.; Gjorv, O. E. Mechanical properties of high-strength lightweight concrete. *ACI Mater. J.* 1991, 88, 240-247. [CrossRef]
79. Babu, D. S.; Ganesh Babu, K.; Wee, T. H. Properties of lightweight expanded polystyrene aggregate concretes containing fly ash. *Cem. Concr. Res.* 2005, 35, 1218-1223. [CrossRef]
80. Shyam Prakash, K.; Rao, C. H. Study on compressive strength of quarry dust as fine aggregate in concrete. *Adv. Civ. Eng.* 2016, 2016, 1742769. [CrossRef]
81. Yew, M. K.; Bin Mahmud, H.; Ang, B. C.; Yew, M. C. Effects of oil palm shell coarse aggregate species on high strength lightweight concrete. *Sci. World J.* 2014, 2014, 387647. [CrossRef]
82. Aslam, M.; Shafigh, P.; Jumaat, M. Z. Drying shrinkage behaviour of structural lightweight aggregate concrete containing blended oil palm bio-products. *J. Clean. Prod.* 2016, 127, 183-194. [CrossRef]
83. Day, K.; Aldred, J.; Hudson, B. Properties of concrete. En *Concrete Mix Design, Quality Control and Specification*, 4th ed.; CRC Press: Boca Raton, FL, EE. UU., 2013.
84. Ismail, S.; Ramli, M. Mechanical strength and drying shrinkage properties of concrete containing treated coarse recycled concrete aggregates. *Constr. Build. Mater.* 2014, 68, 726-739. [CrossRef]

85. Al-Jabri, K. S.; Hisada, M.; Al-Saidy, A. H.; Al-Oraimi, S. K. Performance of high strength concrete made with copper slag as a fine aggregate. *Constr. Build. Mater.* 2009, 23, 2132-2140. [CrossRef]
86. Aliabdo, A. A.; Abd Elmoaty, A. E. M.; Fawzy, A. M. Experimental investigation on permeability indices and strength of modified pervious concrete with recycled concrete aggregate. *Constr. Build. Mater.* 2018, 193, 105-127. [CrossRef]
87. Tangchirapat, W.; Jaturapitakkul, C. Strength, drying shrinkage, and water permeability of concrete incorporating ground palm oil fuel ash. *Cem. Concr. Compos.* 2010, 32, 767-774. [CrossRef]
88. Lee, D. T. C.; Lee, T. S. The effect of aggregate condition during mixing on the mechanical properties of oil palm shell (OPS) concrete. En *Proceedings of the MATEC Web of Conferences*, Amsterdam, Países Bajos, 23-25 March 2016.
89. Lee, Y. H.; Chua, N.; Amran, M.; Lee, Y. Y.; Kueh, A. H.; Fediuk, R.; Vatin, N.; Vasilev, Y. Thermal performance of structural lightweight concrete composites for potential energy saving. *Crystals* 2021, 11, 461. [CrossRef]

Mejora de la durabilidad de compuestos de hormigón sostenibles que comprenden residuos de película metalizada, fibras de envases de alimentos y cenizas de caldera de aceite de palma*

Durability Enhancement of Sustainable Concrete Composites Comprising Waste Metalized Film, Food Packaging, Fibers and Palm Oil Fuel Ash

CITACIÓN: Alyousef, R., Mohammadhosseini, H., Ebid, A. A. K., Alabduljabbar, H., Ngian, S. P., Mohamed, A. M. (2023). Mejora de la durabilidad de compuestos de hormigón sostenibles que comprenden residuos de película metalizada, fibras de envases de alimentos y cenizas de caldera de aceite de palma. *Palmas*, 44(2), 104-125.

EDITORES ACADÉMICOS: Quoc Tri Phung & Nguyen Van Tuan.

NOTA DEL EDITOR: MDPI se mantiene neutral con respecto a las reclamaciones jurisdiccionales en los mapas publicados y las afiliaciones institucionales.

PALABRAS CLAVE: Compuestos de hormigón sostenibles, Residuos de fibras de polipropileno metalizadas, Propiedades de resistencia, Penetración rápida de cloruro, Resistividad eléctrica.

KEYWORDS: Sustainable concrete composites, Waste metalized polypropylene fibers, Strength properties, Rapid chloride penetration, Electrical resistivity.

*Traducido del original Durability Enhancement of Sustainable Concrete Composites Comprising Waste Metalized Film Food Packaging Fibers and Palm Oil Fuel Ash Recuperado de *Sustainability* 2022, 14, 5253. <https://doi.org/10.3390/su14095253>

Derechos de autor: © 2022 de los autores. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia Creative Commons (CC BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/>)

ALYOUSEF, RAYED*

Departamento de Ingeniería Civil, facultad de Ingeniería, Universidad Príncipe Sattam Bin Abdulaziz, Arabia Saudí

* Autor para correspondencia: r.alyousef@psau.edu.sa

MOHAMMADHOSSEINI, HOSSEIN

Facultad de Ingeniería, departamento de Ingeniería Civil, Universiti Teknologi Malaysia (UTM). Skudai 81310, Malasia

EBID, AHMED ABDEL KHALEK

Ingeniería Estructural y Gestión de la Construcción, facultad de Ingeniería, Future University en Egipto, Nuevo Cairo 11835, Egipto

ALABDULJABBAR, HISHAM

Departamento de Ingeniería Civil, facultad de Ingeniería, Universidad Príncipe Sattam Bin Abdulaziz 11942, Arabia Saudí

NGIAN, SHEK POI

Facultad de Ingeniería, departamento de Ingeniería Civil, Universiti Teknologi Malaysia (UTM), Skudai 81310, Malasia

MOHAMED, ABDELIAZIM MUSTAFA

Departamento de Ingeniería Civil, facultad de Ingeniería, Universidad Príncipe Sattam Bin Abdulaziz 11942, Arabia Saudí

Resumen

El uso de residuos en la fabricación de hormigón sostenible y ecológico es particularmente atractivo debido al bajo costo de los mismos, el ahorro de espacio en los rellenos sanitarios y al desarrollo y mejora de las calidades del hormigón. Este artículo investiga la resistencia y

la durabilidad de los compuestos de hormigón ecológico hechos de fibras de envases de alimentos de lámina metalizada (MFP por sus siglas en inglés) y ceniza de caldera de aceite de palma (POFA por sus siglas en inglés). Las propiedades exploradas incluyen las resistencias a la compresión y la tensión, la carbonatación, la contracción por secado, la resistividad eléctrica y las pruebas rápidas de penetración de cloruro en mezclas de hormigón. Con cemento Portland ordinario (OPC por sus siglas en inglés), se emplearon fibras MFP de 20 mm de longitud y fracciones de 6 volúmenes que variaban de 0 a 1,25 %. Se hicieron otras 6 mezclas de hormigón con 20 % de POFA en lugar de OPC, por sus siglas en inglés. Los resultados mostraron que la adición de fibras MFP a las mezclas de hormigón reducía su resistencia a la compresión. Y a pesar de tener una reducción menor en la resistencia a la compresión, la inclusión de fibras MFP aumentó significativamente la resistencia a la tracción. Los hallazgos mostraron que la combinación de fibras de MFP con POFA afectó sustancialmente la durabilidad del hormigón. La adición de fibras MFP a las mezclas de hormigón dio como resultado una reducción de la carbonatación y la contracción por secado. También se redujo la penetración de cloruros en las muestras mientras que la resistividad eléctrica de las muestras reforzadas aumentó casi un 80 % en comparación con el hormigón ordinario.

Abstract

The utilization of waste materials in sustainable and green concrete manufacturing is particularly appealing because of the low cost of waste resources, the saving of landfill space, and the development and enhancement of concrete qualities. This paper investigates the strength and durability of green concrete composites made of waste metalized film food packaging (MFP) fibers and palm oil fuel ash (POFA). Compressive and tensile strengths, carbonation, drying shrinkage, electrical resistivity, and rapid chloride penetration tests in concrete mixtures are among the properties explored. With ordinary Portland cement (OPC), MFP fibers of 20 mm in length and six-volume fractions ranging from 0 to 1.25% were employed. Another six concrete mixes were made with 20% POFA in place of OPC. The results showed that adding MFP fibers to concrete mixes reduced their compressive strength. Despite a minor reduction in compressive strength, the inclusion of MFP fibers significantly increased tensile strength. The findings show that the combination of MFP fibers with POFA substantially impacts concrete durability. The addition of MFP fibers to concrete mixes resulted in a reduction in carbonation and drying shrinkage. The chloride penetration of specimens was also reduced, whereas the electrical resistivity of reinforced samples rose by nearly 80% compared to ordinary concrete.

1. Introducción

El objetivo principal del desarrollo de una producción más limpia es disminuir los residuos industriales y el uso de los recursos naturales. La producción más limpia se refiere a los procedimientos que optimizan la calidad de la producción mediante la mejora de la ecoeficiencia y el uso de menos materias primas. El número y las variedades de residuos sólidos han crecido con el aumento de la población, la industrialización y la urbanización. Varios tipos de residuos no biodegradables durarán cientos, si no, miles de años en el medio ambiente, estos repercuten negati-

vamente en la eliminación de la basura y constituyen un grave peligro para este. Se está haciendo hincapié en el manejo eficiente y eficaz de los residuos para mantener la viabilidad a largo plazo de la construcción ecológica. Como resultado, su uso es uno de los aspectos más importantes en los planes de manejo de residuos en muchas regiones del mundo [1-3].

La minimización de los residuos presenta una excelente oportunidad para una fabricación más limpia, ya que optimiza la eficiencia energética, reduce el uso de energía y mejora el funcionamiento técnico de una industria. El concepto de sostenibilidad aboga por utilizar los residuos para sustituir las materias

primas como los agregados finos y gruesos, cemento y materiales fibrosos en el sector de la construcción. Esto conduciría a edificios sostenibles y respetuosos con el medio ambiente al reducir el costo de los materiales debido a la sustitución y los gastos de manejo adecuado de los residuos [4]. Los bajos costos energéticos están relacionados con los materiales ecológicos, y su uso debe ser duradero y de bajo mantenimiento, lo que resulta en materiales de construcción perdurables [5, 6].

En 2015, el uso mundial de plástico alcanzó los 297,5 millones de toneladas y Asia representó el 30 % del consumo mundial en los últimos años. La basura plástica constituyó alrededor de 16 % del peso total de los residuos sólidos municipales. La poliolefina, un plástico popular, es menos biodegradable, y cuando se elimina como basura sólida tiene un impacto perjudicial a largo plazo sobre el medio ambiente. La biodegradación de diversos tipos de plásticos, como el polietileno de alta densidad (HDPE por sus siglas en inglés), el polietileno de baja densidad (LDPE por sus siglas en inglés), el polipropileno (PP) y el poliestireno (PS) en suelos naturales, reveló que algunos microorganismos del suelo, como hongos y bacterias, tienen una capacidad metabólica específica para asimilar estos plásticos como fuentes de carbono y energía para su crecimiento [7]. Aproximadamente la mitad de estos materiales eran productos de consumo de un solo uso, lo que tuvo un impacto considerable en el aumento de los residuos plásticos. De acuerdo con Sharma y Bansal [8], los plásticos contribuyen con un volumen cada vez mayor al flujo de residuos sólidos debido a su amplia variedad de aplicaciones. Como resultado, los datos cuantitativos sobre la producción de residuos plásticos rara vez se hacen públicos porque generalmente se mantienen internamente o se administran comercialmente. Según Plastics Europe, Europa crea 25 millones de toneladas de basura plástica cada año [9]. Más de una cuarta parte de los residuos generados en los Estados Unidos en 2014 se reutilizó de manera eficiente, mientras que el resto se destinó al reciclaje energético y rellenos sanitarios [10].

Las tasas mundiales de reciclaje y recuperación energética han aumentado gradualmente en la última década, lo que ha provocado una disminución de la eliminación de residuos en los rellenos sanitarios. La tasa de vertido varía sustancialmente en toda Europa.

Las prohibiciones de vertido se han traducido en menos de un 10 % de eliminación de residuos plásticos. Según Erkisen *et al.* [11], en otros países casi la mitad de todos los residuos plásticos terminan en los rellenos sanitarios. Según Faraca y Astrup [12], la mayoría de los plásticos son no biodegradables y químicamente inertes en la naturaleza. Este tipo de productos basados en polímeros tienen el potencial de durar décadas o quizás siglos en el medio ambiente. Como resultado de las reacciones químicas en ciertos plásticos, como el PC, PP y PVC, pueden liberarse compuestos peligrosos al aire, al agua y al suelo [13]. En consecuencia, a los ojos del público, los plásticos desechados en cualquiera de sus formas son un gran problema medioambiental.

No obstante, la mayoría de los residuos plásticos, aunque no todos los tipos de residuos de polímeros, pueden reutilizarse y tratarse térmica o químicamente [14]. Los de láminas de polipropileno metalizado (MFP) se producen y desechan en rellenos sanitarios de todo el mundo. Estos se utilizan principalmente en el envasado de alimentos y están hechos de materiales poliméricos con un recubrimiento de aluminio delgado en la parte exterior. El MFP es el menos procesable y reciclable de todos los residuos plásticos [9]. Dado que no hay una forma adecuada de reciclar una cantidad tan grande de residuos, estos se desechan y se queman en rellenos sanitarios [15,16]. Por consiguiente, se han vuelto necesarios métodos de eliminación confiables para reemplazar los procesos existentes.

El hormigón es un material de construcción bien conocido en todo el mundo debido a la accesibilidad de los materiales, la simplicidad de fabricación y la buena durabilidad y propiedades mecánicas [17]. Sin embargo, debido a su uso generalizado, particularmente en el sector industrial, se ve sometido constantemente a ataques químicos. Estos pueden ocurrir de forma natural, como los sulfatos en los suelos y las aguas subterráneas, o a través de ataques químicos antropogénicos, como las aguas residuales de drenajes y las aguas residuales industriales, que degradan el desempeño de las estructuras y limitan su vida útil. Liu *et al.* [18] sugirieron que la degradación del hormigón podría deberse a procesos químicos causados por el intercambio iónico en tales entornos hostiles. Como resultado de estas acciones, los productos de hidratación se degradan, formando compuestos peli-

grosos en el hormigón, como la etringita y partículas de yeso. En consecuencia, la microestructura presenta grietas, astillado y desigualdades, lo que reduce la resistencia y la durabilidad de las construcciones de hormigón [19,20]. Según Abro *et al.* [21] y Buller *et al.* [22], el agrietamiento es uno de los problemas más comunes con el hormigón simple sujeto a químicos, por lo que se requieren enfoques prácticos para reducir la fragilidad de sus componentes bajo ataques químicos. Estos autores señalaron que el uso de fibras cortas puede reforzarlo y mejorar su rendimiento en condiciones duras al mejorar la fragilidad del hormigón. Además, Alrshoudi *et al.* [23] y Alnahhal *et al.* [24] encontraron que el uso de materiales puzolánicos como los de cementación parcial, como la ceniza residual en las calderas de las plantas de beneficio de palma de aceite (POFA), mejoró el rendimiento del hormigón sometido a ataques químicos al reducir la tasa de pérdida de masa y pérdida de resistencia.

No cabe duda de que se está prestando especial atención a la gestión más limpia y eficiente de varios tipos de generación de residuos para garantizar la sostenibilidad en la construcción ecológica. Los residuos son una de las principales preocupaciones en cuanto a las técnicas para su gestión. El reciclaje beneficia al medio ambiente al reducir la contaminación, minimizar el vertido y la eliminación de desechos, y proteger los recursos naturales. Se ha desarrollado una nueva forma de hormigón utilizando residuos plásticos como componentes fibrosos y POFA como sustituto parcial del cemento. Debido a que la POFA es un material puzolánico, se empleó para crear compuestos de hormigón y se aprovechó la disponibilidad local de residuos plásticos. Teniendo en cuenta lo anterior, el objetivo de este estudio es analizar el impacto combinado de las fibras de residuos plásticos y la POFA en el comportamiento del hormigón y ver cómo las primeras contribuyen a una mejor absorción de energía en comparación con el hormigón simple sin fibras. El uso de fibras plásticas residuales y POFA en la fabricación de hormigón ecológico y sostenible podría tener beneficios ambientales y económicos.

Además, es útil ya que reduce los problemas de vertido y el consumo de materias primas, al tiempo que aumenta la creación de elementos de construcción ecológicos y sostenibles. La literatura actual ha sugerido que los materiales puzolánicos y las fibras

cortas mejoran el rendimiento del hormigón frente a ataques químicos. El objetivo de este estudio fue investigar los efectos combinados de los residuos plásticos y la POFA en la resistencia y la durabilidad del hormigón. Aunque este análisis incluye una investigación sobre las fibras de base polimérica, como el polipropileno (PP), los experimentos y análisis realizados se basan en un tipo de fibra: los envases de alimentos de película metalizada (MFP). Este trabajo se ha centrado en el desempeño del hormigón que contiene fibras de MFP y POFA expuestas a productos químicos, pero se cree que es necesario comprender y solucionar ciertos problemas técnicos antes de utilizar cualquier fibra fabricada con residuos en el hormigón. En este estudio se realizó una comparación entre la resistividad eléctrica, la penetración rápida de cloruro, la contracción por secado y la resistencia de las mezclas de hormigón que contienen fibras MFP y hormigón liso. Además, se empleó difracción de rayos X (XRD) y microscopía electrónica de barrido (MEB) para investigar la microestructura de los compuestos de hormigón.

2. Programa experimental

2.1 Materiales

En esta investigación se empleó un hormigón tipo I que cumplía con los requisitos de ASTM C 150-07. Además, se reemplazó la POFA por OPC a un nivel de sustitución de 20 %. Se utilizaron los residuos de las plantas de beneficio del sector para obtener las partículas de ceniza de caldera de planta de beneficio en bruto. Estas se secaron a 100 °C antes de tamizarlas para eliminar las partículas más grandes que 150 µm. Posteriormente, las diminutas partículas de ceniza se almacenaron en una máquina de trituración y la operación de molienda se repitió durante aproximadamente 2 horas por cada 4 kg de ceniza. Las partículas de POFA molidas se probaron de acuerdo con los requisitos de BS 3892: 1-1992 y ASTM C618-15 para conseguir las características requeridas, como se muestra en la Figura 1. Como materiales de cementación se emplearon las cenizas que cumplían con los estándares requeridos y tenían las composiciones químicas y cualidades físicas apropiadas, como se muestra en la Tabla 1. Se utilizó arena de río natural, con un peso específico de 2,6 g/cm³, un módulo granulométrico de 2,3, absorción de

agua del 0,7 % y un tamaño máximo de 4,75 mm. Se emplearon agregados gruesos de granito triturado con una absorción de agua de 0,5 %, un peso específico de 2,7 g/cm³ y un tamaño máximo de 10 mm. Las fibras fabricadas con residuos de envases de alimentos de película metalizada con un procedimiento de metalización de aluminio utilizado en

envases de alimentos, se recogieron como basura y se limpiaron para eliminar cualquier contaminante. Las láminas de residuos se dividieron entonces en fibras de 2 mm de ancho y 25 mm de largo, como se muestra en la Figura 2. La Tabla 2 muestra los parámetros de ingeniería típicos de la fibra MFP empleada en este trabajo.

Figura 1. Imagen MEB de partículas POFA

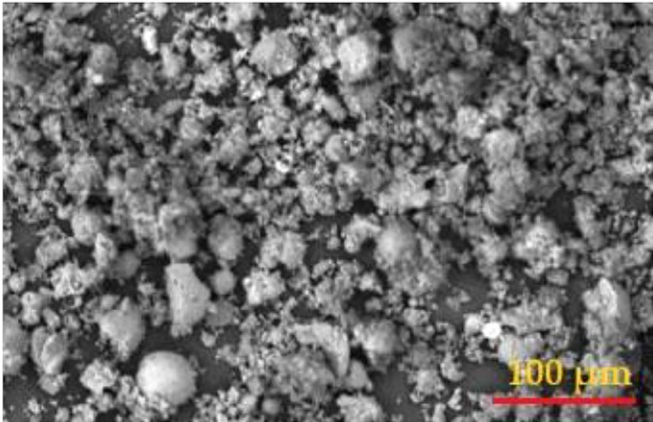


Tabla 1. Propiedades del OPC y POFA.

Material	Propiedades físicas		Composición química (%)							
	Gravedad específica	Finura de Blaine	SiO ₂	AL ₂ O ₃	FE ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	SO ₃	LOI: loss on ignition
OPC	3,15	3.990	20,3	5,3	4,21	62,5	1,53	0,005	2,13	2,35
POFA	2,42	4.930	62,7	4,8	8,14	5,8	3,54	9,07	1,17	6,28

Figura 2. Fibras fabricadas a partir de residuos de envases de alimentos de lámina metalizada

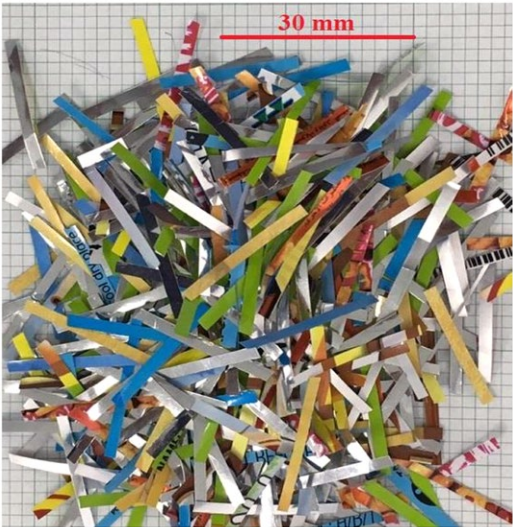


Tabla 2. Propiedades típicas de las fibras MFP.

Tipo de resina	Tamaño (ancho x largo) (mm)	Rango de densidad (kg/m ³)	Grosor (mm)	Resistencia a la tracción (MPa)	Elongación
Polipropileno	2 x 25	0,94	0,08	560	8-10

2.2 Proporciones de mezcla y métodos de prueba

La Tabla 3 muestra las proporciones de mezcla de los diversos componentes utilizados en la producción de compuestos de hormigón. En total, se hicieron 12 mezclas de hormigón, de las cuales el primer lote fue la mezcla de control sin ningún POFA ni fibras. Entre las 12 mezclas, 6 lotes contenían OPC con fracciones de volumen de fibra de 0 %, 0,25 %, 0,5 %, 0,75 %, 1,0 % y 1,25 % (B1-B6). Se hicieron otros 6 lotes con POFA, reemplazando el OPC en un 20 % para las mismas fracciones de volumen de fibra (B7-B12), con una relación constante de agua/aglutinante (a/g) de 0,48. El procedimiento de combinación de componentes para hormigón reforzado con fibra difirió ligeramente del de cemento convencional. En la primera fase se añadieron POFA y OPC a una mezcla seca de agregados finos y gruesos. Se adiciona-

ron el superplastificante y el agua y se agitó durante aproximadamente 2 minutos. Finalmente, se añadió la cantidad deseada de fibras y el proceso de mezcla se mantuvo durante otros 2 minutos para asegurar que estas se distribuyeran uniformemente por toda la mezcla.

Para evaluar la resistencia a la compresión, se construyeron especímenes cúbicos con lados de 100 mm de acuerdo con las normas BS EN 12390:2-09 y BS EN 12390-3:09. Se prepararon especímenes cilíndricos de 100 mm x 200 mm de acuerdo con las normas ASTM C496-11 y ASTM C512, respectivamente, para dividir las mediciones de resistencia a la tracción y contracción por secado. Después de curar los especímenes de hormigón en el tanque de agua durante 28 días, se llevó a cabo una prueba de contracción por secado desde el día 1 hasta el día 180. Al completarse el periodo de curado, los especímenes se colocaron en una cámara de secado con temperatura y humedad

Tabla 3. Descripción de las proporciones de mezcla para varias mezclas de hormigón.

Mezcla	Cemento (kg/m ³)	POFA (kg/m ³)	Agua (kg/m ³)	Agregado fino (kg/m ³)	Agregado grueso (kg/m ³)	V _f (%)
B1	440	-	212	835	855	0,0
B2	440	-	212	835	855	0,25
B3	440	-	212	835	855	0,50
B4	440	-	212	835	855	0,75
B5	440	-	212	835	855	1,0
B6	440	-	212	835	855	1,25
B7	352	88	212	835	855	0,0
B8	352	88	212	835	855	0,25
B9	352	88	212	835	855	0,50
B10	352	88	212	835	855	0,75
B11	352	88	212	835	855	1,0
B12	352	88	212	835	855	1,25

controladas durante el periodo de prueba. Además, se expusieron especímenes cilíndricos de 100 mm x 200 mm a una atmósfera propensa al dióxido de carbono (CO_2) para evaluar el ataque de la carbonatación sobre el hormigón. La profundidad de carbonatación de los especímenes de hormigón bajo difusión de CO_2 podría usarse para determinar la resistencia de estos a la carbonatación. A lo largo de la prueba se siguió el procedimiento propuesto por el Comité CPC-18 del RILEM. La profundidad de la carbonatación apareció mediante la aspersión de la solución de fenolftaleína en los lados divididos de los especímenes de hormigón, como se muestra en la Figura 3. Se puede ver que el color del área no carbonatada cambió a púrpura, mientras que el del área carbonatada permaneció incoloro. Los investigadores midieron la profundidad de carbonatación a los 90 y 180 días. Por lo tanto, se utilizó el espacio entre el borde de los especímenes y el límite de color púrpura para determinar la profundidad promedio de carbonatación.

Se realizó una prueba de penetración rápida de cloruro de acuerdo con la norma ASTM C1202-12. Se hizo en especímenes cilíndricos de 100 mm x 50 mm que se curaron y saturaron adecuadamente en la superficie después de 28 y 90 días. El espécimen saturado se colocó entre 2 celdas de plexiglás, y los bordes de los especímenes y las celdas se sellaron con un sellador de alta viscosidad. Se puso una solución de hidróxido de sodio (NaOH) 0,3 N en la celda conectada al

terminal positivo de la fuente de alimentación. Por otro lado, la celda conectada al terminal negativo se llenó con una solución de cloruro de sodio (NaCl) al 3 %. La energía fue suministrada por una fuente de alimentación de CD regulada por APLAB, modelo 7231, con una resistencia de derivación para la medición de corriente. Se probaron 3 especímenes diferentes para cada edad de curado. Se mantuvo una diferencia de potencial de DC de 60 voltios (60 v) a lo largo del espécimen durante 6 horas, con lecturas de corriente tomadas cada 30 min. Se calculó la carga total recorrida a través del espécimen de hormigón y se realizaron las correcciones apropiadas utilizando la Ecuación (1). Por otra parte, los especímenes de hormigón con OPC y POFA se sumergieron en una solución de cloruro de sodio al 5 % (NaCl) durante 90 días para analizar su estructura mediante el uso de microscopía electrónica de barrido (MEB) y difracción de rayos X (XRD) bajo el ataque de cloruro.

Ecuación 1

$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{300} + 2I_{330} + 2I_{360})$$

donde Q es la carga pasada (culombios) e I es la corriente (amperios) en un momento dado ($t = 0$ a 360 min).

Figura 3. Indicación de la profundidad de la carbonatación en especímenes de hormigón mediante el uso de solución de fenolftaleína



El Resipod SFE 2011.03.31, un medidor de resistividad eléctrica de alta resolución de la marca Proceq, evaluó la resistividad eléctrica del hormigón. De acuerdo con el método de ensayo estándar AASHTO-TP-95-11, la prueba se realizó utilizando la técnica de sonda de matriz de Wenner de 4 puntos. La prueba se realizó a los 28 y 90 días en superficies suficientemente curadas y saturadas con especímenes cilíndricos de 100 mm x 200 mm. Se midieron 4 posiciones longitudinales cuaternarias del espécimen y cada ubicación se midió 1 vez. En consecuencia, se recogieron 24 mediciones de resistividad para 3 especímenes. Se calculó la resistividad eléctrica del hormigón promediando las mediciones registradas para cada espécimen.

3. Resultados y discusión

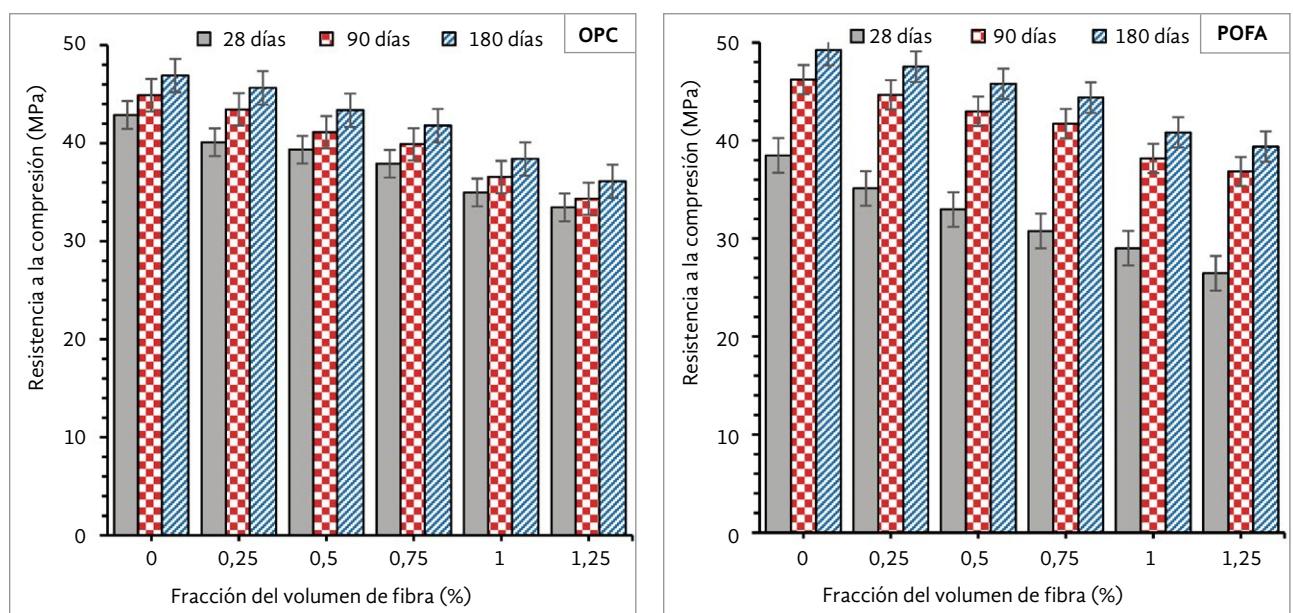
3.1 Resistencia a la compresión

La Figura 4 muestra los resultados de la prueba de resistencia a la compresión para mezclas de hormigón, incluidas las fibras MFP. Estos mostraron que la adición de fibras MFP a las mezclas de hormigón redujo su resistencia a la compresión. También se observó que a edades superiores a 90 días, los valores de resistencia adquiridos en las mezclas de POFA fue-

ron más significativos que en las mezclas de OPC. Las resistencias a la compresión de las mezclas de hormigón OPC de 28 días que comprenden 0,25 %; 0,5 %; 0,75 %; 1 %; y 1,25 % de fibras de MFP fueron 40,1; 39,4; 37,9; 35 y 33,5 MPa, respectivamente, que son ligeramente inferiores a los 42,8 MPa observados para la mezcla de hormigón simple con 0 % de fibras de MFP. De manera similar, a los 28 días, la adición de las mismas fracciones de volumen de fibras MFP a las mezclas de POFA dio como resultado resistencias a la compresión de 35,1; 33; 30,8; 29,1; y 26,5 MPa, respectivamente, que son menores que los 38,5 MPa observados para la mezcla POFA-liso. Se puede observar que los valores de resistencia adquiridos de las mezclas de POFA fueron algo menores que los de las mezclas de POFA después de un tiempo de curado de 28 días. Esto podría deberse a la tasa de hidratación retardada de POFA, que causa niveles de resistencia más bajos a una edad temprana. Además, las cavidades en los especímenes de hormigón, causadas por la falta de productos de hidratación en las mezclas de POFA y el efecto de bola causado por una mayor dosis de fibra, dan como resultado valores de resistencia significativamente más bajos [25].

Sin embargo, debido a la utilización de POFA y sus fuertes características puzolánicas, las resisten-

Figura 4. Resistencia a la compresión de mezclas de hormigón con fibras MFP



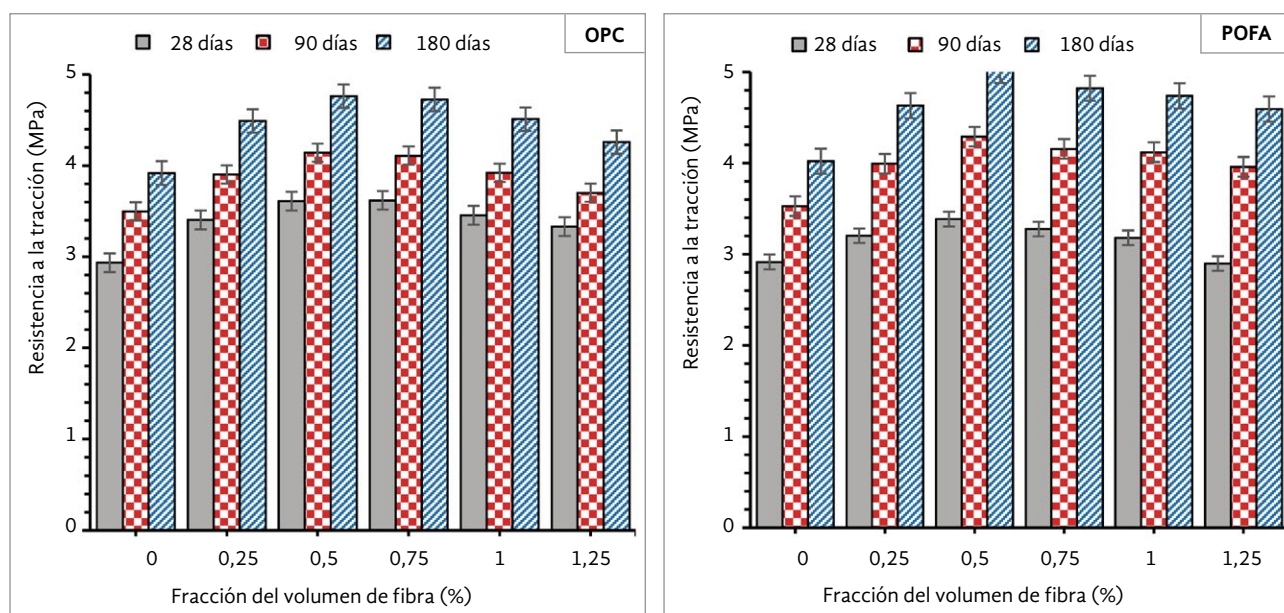
cias obtenidas de las mezclas de hormigón fueron significativamente mayores que las de las mezclas de edad temprana después de un periodo de curado prolongado de 180 días. Por ejemplo, se observaron resistencias a la compresión de 47,6; 45,8; 44,4; 40,8; y 39,4 MPa para las mezclas de POFA con el mismo contenido de fibra después de 180 días de curado, que son todas superiores a 30 Mpa y, con base en las especificaciones estándar, pueden usarse como aplicación estructural. Las mezclas de OPC con las mismas dosis de fibra tenían valores de resistencia a la compresión más bajos, iguales a 45,6; 43,7; 41,8; 38,4; y 36,1 MPa. Se descubrió que las mezclas de POFA tenían mejores valores de resistencia que los especímenes de OPC cuando el contenido de fibra era el mismo. Los hallazgos de este estudio son comparables a los publicados por Mujedu *et al.* [26], que demostraron un aumento considerable en la resistencia a la compresión del hormigón mediante el uso de POFA como sustituto parcial del cemento durante los tiempos de curado prolongados.

3.2 Resistencia a la tracción

Los resultados de la prueba de resistencia a la tracción para mezclas de hormigón que tienen las fibras

de MFP a diferentes edades se muestran en la Figura 5. Se puede observar que la adición de estas fibras mejoró notablemente la resistencia a la tracción de todas las mezclas de hormigón, y todos los especímenes de hormigón reforzado tuvieron una mejor resistencia a la tracción que la mezcla de control. A partir de los 90 días, el desarrollo de resistencia de las mezclas de POFA fue mayor que el de las combinaciones de OPC. La inclusión de fibras de MFP a dosis de 0,25 %; 0,5 %; 0,75 %; 1 %; y 1,25 % dio como resultado resistencias a la tracción de 3,4; 3,61; 3,65; 3,46; y 3,3 MPa, respectivamente, después de un tiempo de curado de 28 días, que es mayor que los 2,93 MPa de la mezcla de control. Para las mismas dosis de fibra, se informaron resistencias a la tracción más bajas de 3,2; 3,4; 3,28; 3,18; y 2,92 MPa para las mezclas de POFA. Además, las resistencias a la tensión de las mezclas de POFA fueron mayores que las de las mezclas de OPC, incluidas las fibras MFP, después de una edad de curado más prolongada de 180 días. La resistencia a la tracción de las mezclas de POFA a los 180 días fue de 4,63; 5,02; 4,82; 4,74; y 4,59 MPa para el mismo contenido de fibra, que es algo mayor que los valores de 4,49; 4,76; 4,7; 4,5; y 4,26 MPa para la mezcla de OPC, respectivamente.

Figura 5. Resistencia a la tracción de mezclas de hormigón reforzadas con fibras MFP



Se demostró que las fibras MFP tienen una capacidad mejorada para soportar la tensión de rotura después del fallo sin colapsarse por completo en la mayoría de los casos. Además, los modos de falla de los especímenes reforzados fueron más dúctiles que los especímenes de hormigón simple. La alta resistencia a la tracción de las mezclas de POFA reforzadas con fibras de MFP durante los tiempos de curado prolongados podría atribuirse a la fuerte unión entre las fibras de MFP y la matriz de hormigón y al efecto de puente de las fibras, lo que evita las microgrietas y que los especímenes se colapsen repentinamente. Además, debido a la creación de productos de hidratación adicionales, la actividad puzolánica de POFA dio como resultado una mayor mejora de la resistencia del hormigón, particularmente con duraciones de curado más largas [27]. El área de contacto entre las fibras y la matriz se reduce con mayores dosis de fibras debido al comportamiento de las plásticas y sus características de conexión limitadas, lo que resulta en valores más bajos de resistencia a la tracción. Por otro lado, todos los especímenes mejorados mostraron una mejor resistencia a la tracción que las mezclas ordinarias [28].

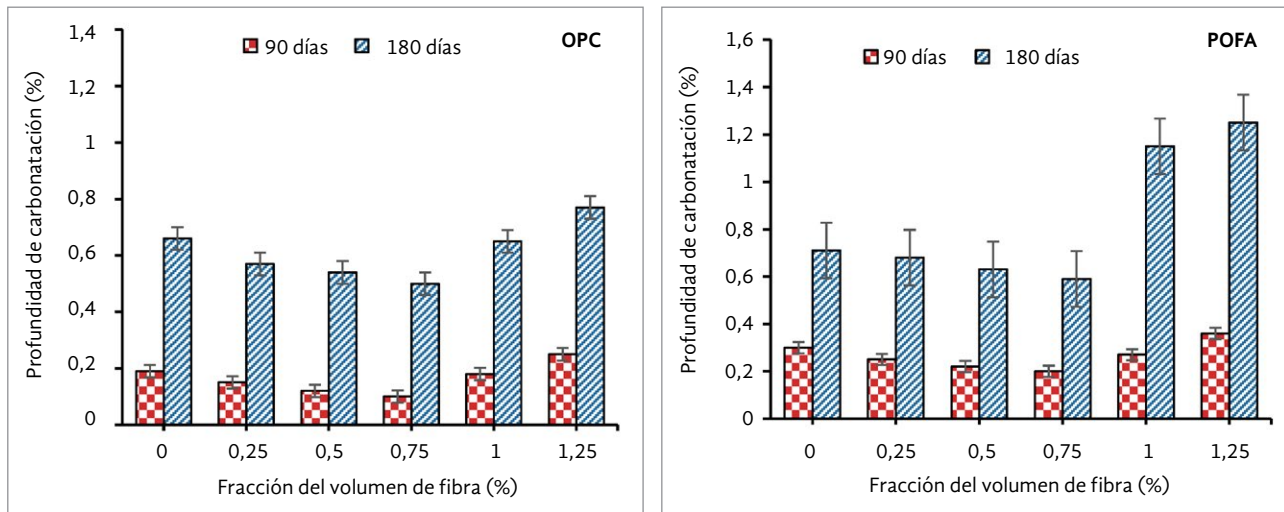
3.3 Carbonatación

La Figura 6 muestra las profundidades de carbonatación natural de mezclas de hormigón con contenidos variados de MFP después de 90 y 180 días de exposición al aire libre. La profundidad de carbonatación se redujo al introducir fibras de MFP en el compuesto de hormigón. Los compuestos de hormigón OPC tenían profundidades de carbonatación más bajas que el hormigón ordinario para dosificaciones de fibra de 0,75 %. Para mezclas de hormigón que comprenden 0,25 %; 0,5 %; y 0,75 % de fibra, se han observado profundidades de carbonatación de 0,57; 0,54; y 0,5 mm. Después de 180 días de exposición, estos hallazgos fueron menores que los 0,66 mm logrados por la mezcla de control. Para que la profundidad de carbonatación crezca por encima de 0,75 % se debe aumentar el contenido de fibra. Se encontró una profundidad de 0,77 mm en la mezcla que contenía 1,25 % de fibra. Un estudio anterior realizado por Zhang y Li [29] encontró que la carbonatación en los compuestos de hormigón se vio afectada por la presencia de fibra de PP.

La propagación de la carbonatación es el proceso por el cual el CO_2 se difunde en el hormigón desde el entorno circundante y, a medida que aumenta la profundidad de difusión del CO_2 , también aumenta la profundidad de carbonatación. Además de la presencia de poros y microgrietas en el hormigón, la carbonatación es provocada por factores externos. La dispersión homogénea de fibras en el compuesto de hormigón pretende proporcionar una red ordenada de fibras cortas para reducir la porosidad capilar. Además, las propiedades antigrietas de las fibras pueden reducir el número de estas en los compuestos de hormigón. Como resultado, la inclusión de fibras de base polimérica en los compuestos de hormigón mejora la resistencia a la carbonatación [30,31].

La cantidad comparativamente modesta de OPC en la mezcla de hormigón y la baja actividad puzolánica de las partículas de POFA a edades tempranas pueden atribuirse al aumento de la carbonatación en los especímenes que contienen POFA. Sin embargo, debido a que la prueba se realizó utilizando una muestra que se había conservado durante 28 días en un tanque de agua, la hidratación del espécimen de POFA se vio comprometida. Por consiguiente, se obstaculizó el crecimiento de la resistencia y se redujo la resistencia a la entrada de partículas químicas dañinas. Las mezclas de POFA tienen menos hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) que el hormigón estándar que no contiene POFA. Dado que la cantidad de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en el hormigón POFA está disminuyendo, existe un mayor riesgo de intrusión de CO_2 del medio ambiente, lo que podría conducir a una carbonatación acelerada [32]. El $\text{Ca}(\text{OH})_2$ formado durante la hidratación del OPC interactúa con la POFA a medida que avanza el proceso puzolánico, reduciendo la concentración de $\text{Ca}(\text{OH})_2$. El CO_2 reacciona con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ durante el proceso de carbonatación. Después de la reacción puzolánica con el hidróxido de calcio en ciertos puntos, el CO_2 penetrará más profundamente en la muestra de hormigón para reaccionar con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ existente y la profundidad de la carbonatación aumentará. Sin embargo, se prevé que el curado satisfactorio del hormigón POFA reduzca la carbonatación debido a la estructura de refinamiento de poros más apretada que resulta de la respuesta puzolánica del POFA en periodos más largos [33,34].

Figura 6. Variación en la profundidad de carbonatación de mezclas de hormigón que contienen fibras MFP



3.4 Contracción por secado

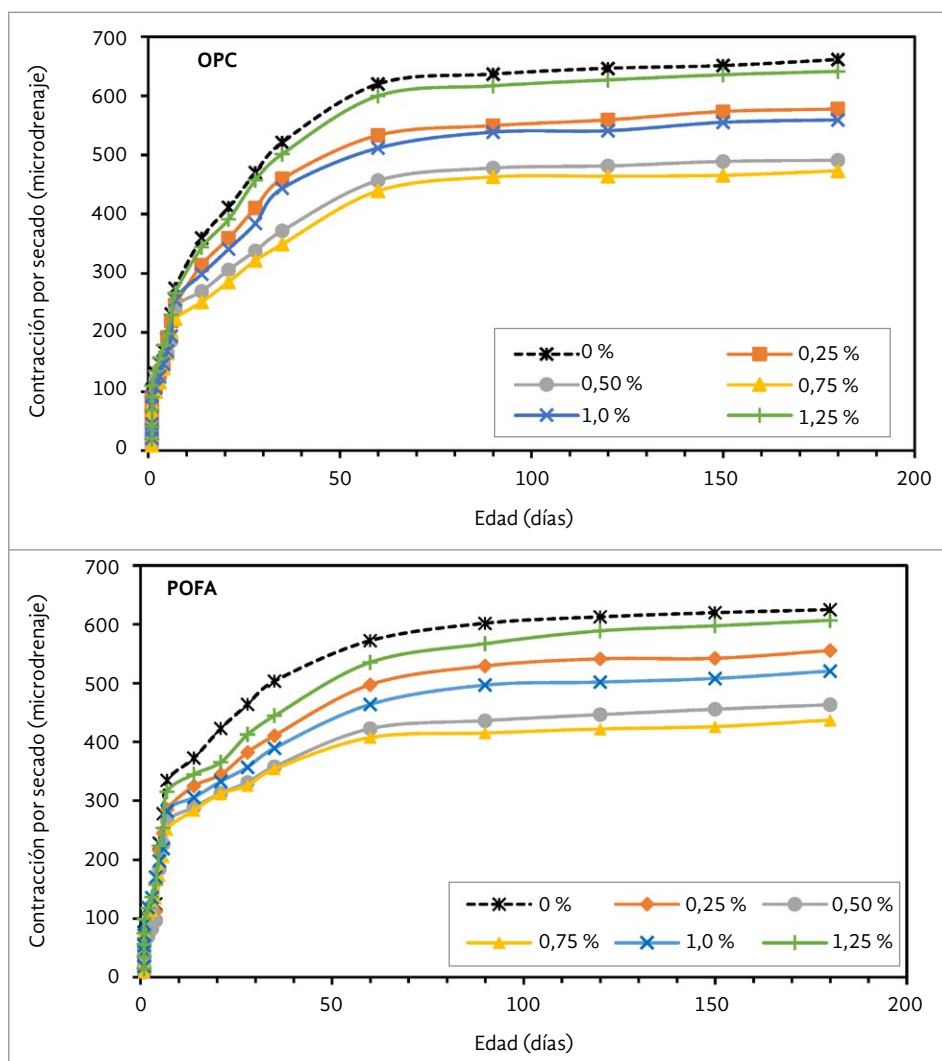
En este estudio se investigó la influencia de las fibras de MFP en el comportamiento de contracción por secado del compuesto de hormigón. Con la adición de estas fibras a todas las mezclas se redujo dicha contracción. La contracción por secado más considerable en los especímenes de hormigón OPC surgió en la mezcla plana de control, como se muestra en la Figura 7. En comparación con la combinación de control de OPC, las mezclas que incluyen 0,25 %; 0,5 %; 0,75 %; 1 %; y 1,25 % de fibras de MFP causaron una disminución del 10,6 %; 25,7 %; 16 %; y 5,5 % en la contracción por secado después de 180 días. Además, la combinación con fibras al 0,75 % mostró la menor contracción por secado. El comportamiento a tracción superior del hormigón y la acción de conexión de las fibras a lo largo de las fracturas se atribuyeron a la reducción de la contracción de las mezclas, incluyendo hasta un 0,75 % de fibra. Las mezclas de hormigón POFA se reforzaron adicionalmente con fibras de MFP, como se ve en la Figura 6. En comparación con el preparado sin fibras, el que tenía 20 % de POFA que incorpora el mismo contenido de fibra de MFP mostró una contracción por secado menor de 11,5 %; 24 %; 29,9 %; 18,5 %; y 6 %, respectivamente.

Debido a que la prueba se realizó utilizando especímenes curados durante 28 días, el proceso de hidratación de los especímenes de POFA se retrasó inicialmente en el periodo de curado. Como resultado, el desarrollo de la resistencia se vio afectado y se mejoró la contracción por secado. Por otro lado, las fibras cortas redujeron la contracción marginalmente al funcionar como una conexión entre la matriz y los agregados. Debido al carácter puzolánico de la POFA y la generación de producto de hidratación adicional durante tiempos de curado prolongados, se creó un fuerte vínculo entre las fibras y la matriz de cemento, lo que resultó en valores de contracción por secado reducidos. El hormigón con cenizas volantes que incorpora fibra de PP exhibió una contracción por secado muy mínima, según Karahan y Atis [35]. También encontraron que el aumento en el contenido de fibra estaba asociado con una disminución en la contracción por secado.

3.5 Resistividad eléctrica

Se pueden usar diferentes pruebas para determinar la resistencia a la corrosión de las barras de refuerzo en el hormigón. También utilizar un método no destructivo de prueba de resistividad eléctrica para eva-

Figura 7. Variación en la contracción por secado de mezclas de hormigón que contienen fibras MFP

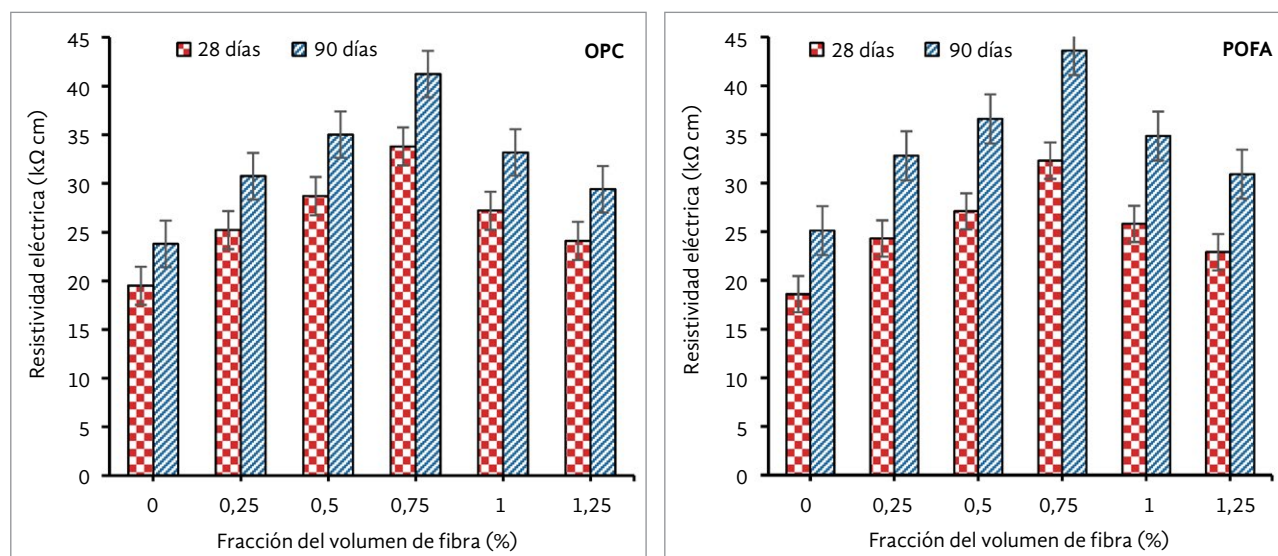


luar el riesgo de corrosión según las clasificaciones existentes [36]. Una mayor resistencia eléctrica significa una menor velocidad de corrosión. Los resultados promedio de la prueba de resistividad eléctrica de las diversas mezclas de hormigón, incluidas las fibras de MFP, se muestran en la Figura 8. Las mezclas de hormigón tenían una verdadera resistividad eléctrica que variaba de 18,5 a 43,7 kΩ cm. Según Wang y Aslani [37], la resistividad eléctrica genuina del hormigón debe ser mayor de 5 kΩ cm porque la tasa de corrosión es considerable por debajo de este nivel. Cuando la resistividad eléctrica genuina del hormigón está entre 5 y 10 kΩ cm, se considera que

tiene una tasa de corrosión moderada a baja; sin embargo, cuando la verdadera resistividad eléctrica está por encima de 10 kΩ cm, se dice que tiene una fuerte resistencia a la corrosión [38].

Todas las mezclas de hormigón en esta investigación tenían una resistencia eléctrica mayor de 10 kΩ cm. A los 90 días, sin embargo, los valores de resistividad eléctrica reales fueron mayores. Se observaron valores de 30,7; 35,1; 41,3; 33,2; y 29,4 kΩ cm para las mezclas de OPC que comprenden 0,25 %; 0,5 %; 0,75 %; 1 %; y 1,25 % de fibra de MFP, respectivamente, que son todas mayores que los 23,8 kΩ cm informados para el hormigón liso de OPC. De manera similar, los valores de

Figura 8. Resistividad eléctrica de mezclas de hormigón reforzadas con fibras MFP



resistividad eléctrica para la mezcla de POFA reforzada con las mismas cantidades de fibra fueron 32,8; 36,6; 43,6; 34,8; y 30,9 kΩ cm, respectivamente, y los valores resultantes son mayores que los 25,1 kΩ cm encontrados en la mezcla lisa.

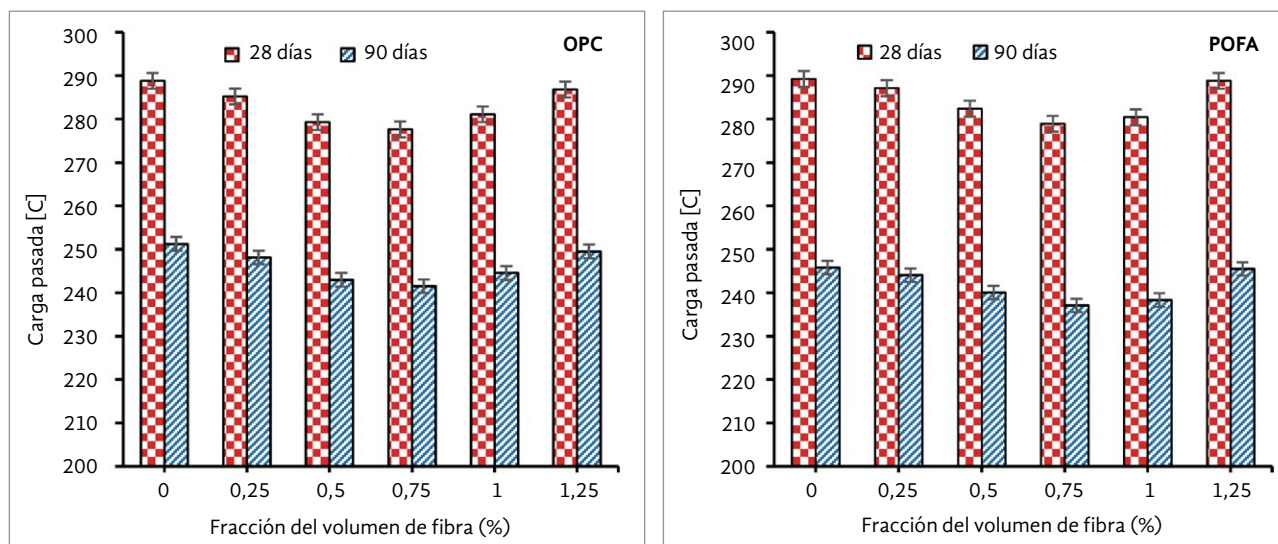
Los hallazgos muestran que la adición de POFA al hormigón afecta significativamente su resistividad eléctrica. En comparación con las mezclas de OPC, la sustitución de 20 % del peso del cemento con POFA aumentó la resistividad eléctrica del espécimen de 90 días. Esto se debe a la actividad puzolánica de POFA, que densifica la microestructura del hormigón y, como resultado, modifica las especies y concentraciones de iones en su matriz. Lim *et al.* [39] encontraron que cuando se agregaron mezclas minerales a la mezcla de hormigón, los productos de hidratación adicionales, como los geles C-S-H y C-A-H, llenaron los microhuecos en la matriz, disminuyendo la porosidad y la conectividad de los poros, con el consiguiente aumento de la resistencia eléctrica. Se descubrió que la combinación que incluía tanto fibras de POFA como de MFP al 0,75 % tenía la mayor resistencia eléctrica.

3.6 Penetración rápida de cloruro

Uno de los asuntos más graves que pueden afectar a las estructuras de hormigón es la durabilidad, espe-

cialmente a medida que el tema de la sostenibilidad se vuelve cada vez más importante. Las estructuras duraderas sobreviven más tiempo que las que no, lo que garantiza la viabilidad de las estructuras de hormigón a largo plazo. La permeabilidad es el atributo más crítico del rendimiento a largo plazo de una estructura de hormigón reforzado. La distribución, el tamaño y la conectividad de las microfisuras y los huecos son las características microestructurales esenciales que determinan la permeabilidad del hormigón [40,41]. En este estudio se utilizó la penetración de cloruro del hormigón para medir la permeabilidad, ya que esta influye en la durabilidad. La Figura 9 muestra la penetración de iones cloruro de diversos hormigones con y sin fibras. La Figura 8 muestra los hallazgos de penetración rápida de iones cloruro determinados por la carga eléctrica transmitida en culombios a través de las fibras de MFP reforzadas en especímenes de hormigón. De acuerdo con las especificaciones de la norma ASTM C1202-12, la penetrabilidad del ion cloruro basada en las cargas pasadas se considera muy baja para valores entre 100 y 1.000 C, baja para valores entre 1.000 y 2.000 C, moderada para valores entre 2.000 y 4.000 C y alta para valores mayores de 4.000 C. Se puede ver que los valores obtenidos oscilan entre 230 y 290 C, que se podría considerar dentro del rango aceptable.

Figura 9. Penetración rápida de cloruros en mezclas de hormigón reforzadas con fibras MFP



La Figura 9 también muestra que la adición de fibras de MFP a las mezclas de hormigón reduce la penetración de los iones de cloruro. La adición de 0,25 %; 0,5 %; 0,75 %; 1 %; y 1,25 % de fibras de MFP a las mezclas de OPC a los 90 días da como resultado valores de carga aprobados de 248,1; 242,9; 241,5; 244,6; y 249,5 C, respectivamente, que son menores que el valor de carga aprobados de la mezcla de OPC de control de 251,3 C. De manera similar, se observaron valores de carga aprobados de 244; 240,1; 237; 238,4; y 245,5 C para las mezclas de POFA reforzadas con los mismos contenidos de fibra que son menores que los 245,8 C informados para la mezcla de POFA de control. En este contexto, Afroughsabet *et al.* [42] encontraron que la inclusión de fibras de PP redujo el coeficiente de migración de iones cloruro de cloruro de FRC, pero la adición de fibras de acero lo aumentó. La inclusión de materiales conductores tales como fibras de acero aumentan considerablemente el coeficiente de paso de cloruro del hormigón ya que la prueba de penetración rápida de cloruro está conectada a la corriente eléctrica que se desplaza sobre la matriz de hormigón.

Además, la Figura 10 muestra la relación entre la resistividad eléctrica y la penetración rápida de iones cloruro en mezclas de hormigón reforzadas con fibras de MFP. Pues tanto la primera como la segunda se correlacionaron linealmente con la bondad de ajuste

(R^2) de 0,7087, lo que indica la naturaleza confiable de los datos. Esta buena asociación se descubrió porque cuanto más significativa es la resistividad eléctrica, mejor es la durabilidad del hormigón, y cuanto menor es la penetración rápida del cloruro, mejor es la durabilidad del hormigón. En consecuencia, una correlación negativa entre los dos valores indica que las cualidades de durabilidad son suficientes.

La POFA, que tenía un tamaño de partícula más fino que el OPC, produjo la densificación de la matriz y llenó los orificios con productos de hidratación adicionales, como el gel C-S-H, lo que resultó en una disminución de la penetración de cloruro [43]. La cantidad de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ se redujo debido al proceso de hidratación y al desarrollo de la actividad puzolánica de POFA. En consecuencia, el aumento del consumo de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ condujo a la creación de un nuevo gel de C-S-H, que redujo el tamaño del vacío y dio como resultado una matriz más sólida con menor porosidad y profundidad de difusión. Las imágenes de MEB de los especímenes de hormigón OPC y POFA curados con agua e inmersión con cloruro se muestran en las Figuras 11 y 12, respectivamente. La formación de gel C-S-H se puede detectar en imágenes MEB de mezclas de hormigón curadas en agua, como se muestra en la Figura 11. La microestructura de las mezclas se alteró regularmente

a medida que continuaba el periodo de curado. Los geles C-S-H de la mezcla a base de POFA se conservan de forma más consistente que los de la mezcla a base de OPC tras 90 días de curado con agua. Varios cristales parecen cruzarse con el gel C-S-H en la mezcla de hormigón OPC. También se aprecian algunos espacios vacíos entre los cristales. La mezcla de POFA, por otro lado, contiene menos espacios y

más componentes de gel que el hormigón OPC. En la mezcla de POFA, se desarrolló una red de geles C-S-H, lo que resultó en una matriz más densa. Esto se atribuye al rendimiento puzolánico de POFA, que mejoró la microestructura de la matriz de hormigón al producir actividad puzolánica y la formación de geles C-S-H adicionales durante los tiempos de curado más largos [44].

Figura 10. Correlación entre la resistividad eléctrica y la penetración rápida de cloruro en las mezclas de hormigón

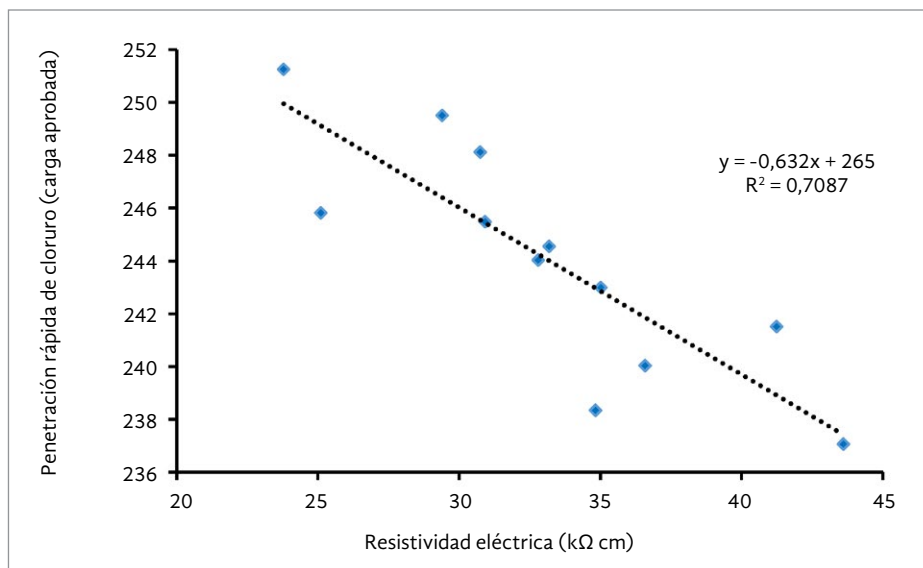


Figura 11. Imágenes de MEB de mezclas de hormigón OPC y POFA curadas en agua

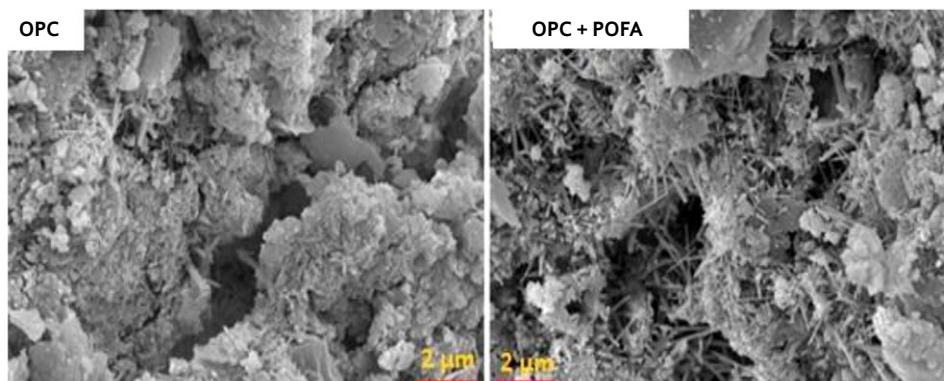
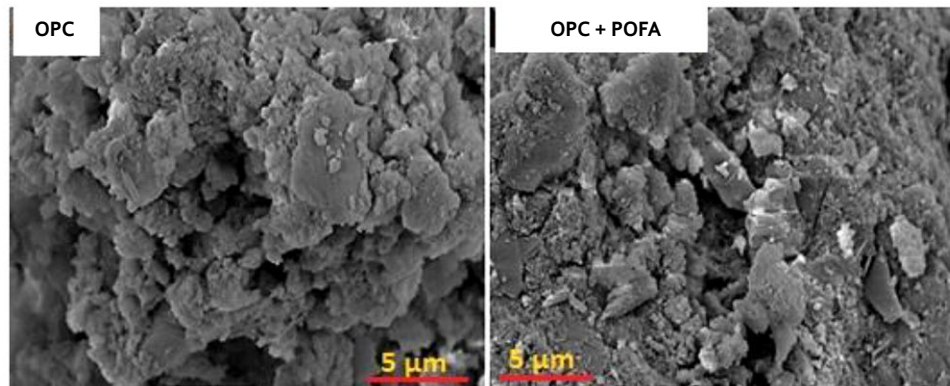


Figura 12. Imágenes de MEB de mezclas de hormigón OPC y POFA sumergidas en solución de NaCl al 5 %



La Figura 12 también demuestra alteraciones en la estructura celular de los especímenes sumergidos en solución de cloruro. Los huecos en forma de esfera en las mezclas de OPC se llenan gradualmente con partículas precipitadas adicionales a medida que avanza el tiempo de exposición. Sin embargo, cuando las mezclas que contenían POFA se sumergieron en solución de cloruro, los cristales de C-S-H adicionales formados debido a la actividad puzolánica de POFA se vieron menos perjudicados por el ataque de cloruro. La microestructura de la mezcla OPC es más variable que la de la mezcla POFA, lo que implica que la durabilidad del hormigón se ve comprometida. Como resultado, la presencia de POFA densificó la matriz, lo que resultó en una disminución del volumen de huecos y microfisuras y una durabilidad mejorada del hormigón.

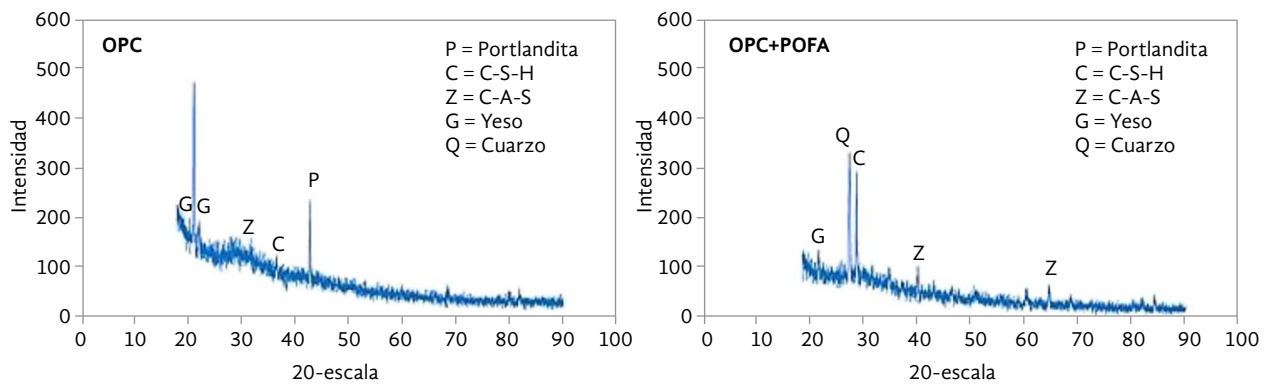
También se realizó un análisis de XRD en los especímenes de hormigón después de 90 días de curado y exposición a solución de cloruro para examinar la variación en la mineralogía de las muestras de concreto curadas en agua y sometidas a solución de cloruro. Los principales productos de hidratación para las curadas en agua, como se muestra en la Figura 13, son Portlandita (P), yeso (G) y cuarzo (Q) para especímenes de OPC y POFA, pero los cristales de hidrato de silicato de calcio (C-S-H) tienen una mayor intensidad en la mezcla de POFA. Cuando se substituyó el OPC por POFA, las intensidades del pico de Portlandita se redujeron significativamente, como se demuestra en el difractograma. Esto se debe

a un exceso de sílice reactiva en la mezcla de POFA, que se combina con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para generar un gel de C-S-H extra durante la fase de hidratación. Cuando el cemento se substituyó por POFA, las intensidades del pico de la muestra se redujeron, como se ve en la Figura 13. En la mezcla de POFA, el CH puede reaccionar químicamente con SiO_2 activo en cantidades significativas para formar geles C-S-H adicionales, lo que mejora la resistencia y durabilidad del hormigón. Como se ve en las figuras de XRD que ilustran POFA, la muestra está dominada por fuertes picos de C-S-H a $2-\theta$ de $28,8^\circ$. Debido a que crea un compuesto ininterrumpido que une las partículas de cemento en una masa cohesiva, el C-S-H es responsable de la mayoría de las cualidades de ingeniería del hormigón.

Además, se detectan trazas de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) en los especímenes de POFA y OPC. La presencia de yeso en el cemento retrasa la reacción de C_3A al fraguado instantáneo. El yeso se descompone y se combina con el C_3A para generar etringita a medida que se introduce agua en la combinación ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$). La etringita se forma a partir de cristales de grano muy fino que forman un recubrimiento en la superficie de las partículas C_3A [45].

Además, se realizó un análisis de XRD en las muestras de hormigón sumergidas en solución de cloruro, los hallazgos se muestran en la Figura 14. Los resultados del análisis de DRX demostraron que los iones cloruro penetraron en las muestras de hormigón e indujeron cambios morfológicos considerables en

Figura 13. Análisis de XRD en mezclas de hormigón OPC y POFA curadas en agua



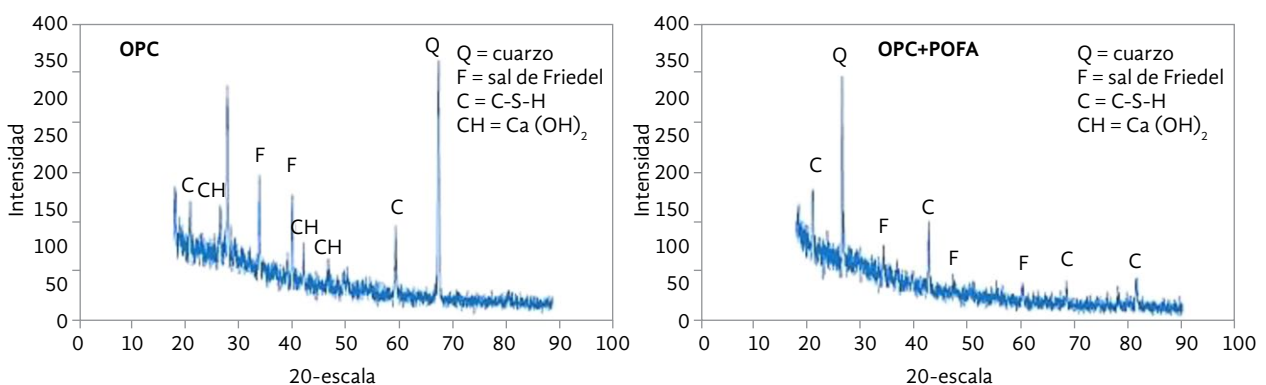
esas mezclas de cemento, principalmente en la OPC. La formación de la sal de Friedel mostró el desarrollo de nuevos componentes en la matriz debido al ataque de cloruro, y el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ siguió estando presente en la matriz después de la exposición al cloruro. Los datos de XRD muestran que la mezcla de OPC tiene una mayor intensidad de sal de Friedel que la mezcla de POFA, lo que podría deberse a la presencia de cavidades que permiten que los iones cloruro entren en la muestra de OPC. La adición de geles de C-S-H a las mezclas de POFA dio como resultado una matriz sólida con durabilidad mejorada y una tasa de penetración de cloruro más baja [46,47]. De acuerdo con el análisis de XRD, la sal de Friedel se encuentra en la muestra de POFA, aunque en una cantidad menor que en el espécimen de OPC.

4. Conclusiones

En este estudio se investiga el impacto de las fibras de envases de alimentos de lámina metalizada (MFP) a diferentes fracciones de volumen y de las cenizas de caldera de plantas de beneficio de palma de aceite como sustituto parcial del cemento en las propiedades de resistencia y durabilidad de los compuestos de hormigón. La investigación experimental arrojó los siguientes resultados:

- La inclusión de fibras de MFP en mezclas de hormigón redujo ligeramente la resistencia a la compresión. Por otro lado, la adición de aditivos minerales en el hormigón aumentó la resistencia a la compresión durante los tiempos de curado pro-

Figura 14. Imágenes de MEB de mezclas de hormigón OPC y POFA sumergidas en solución de NaCl al 5 %



longados. La POFA densificó la microestructura del hormigón y mejoró las propiedades del hormigón en periodos de curado más prolongados.

- Las fibras de MFP mejoraron la resistencia a la tracción del hormigón al tiempo que aumentaron significativamente su ductilidad. En general, cuanto mayor es el porcentaje de volumen de fibra en las mezclas de hormigón, más significativo es el aumento de la resistencia a la tracción. La unión entre las fibras y la matriz de cemento inhibió la propagación de microgrietas y mejoró el comportamiento posterior al agrietamiento del hormigón.
- Las fibras de MFP de hasta el 0,5 % en las mezclas de OPC redujeron la profundidad de carbonatación en aproximadamente 16 % después de 180 días de exposición al CO_2 . Debido a la reactividad puzolánica más lenta de POFA, la inclusión de esta en las mezclas de hormigón causó una mayor profundidad de carbonatación que las mezclas OPC.
- La contracción por secado de mezclas de hormigón reforzado con OPC y POFA fue influenciada considerablemente por fibras MFP en todas las fracciones de volumen. Para un material compuesto de hormigón que contenía 0,75 % de fibras de MFP y 20 % de POFA después de 180 días de prueba, la contracción por secado disminuyó en aproximadamente 30 %.
- La adición de fibras de POFA y de MFP a las mezclas de hormigón afectó sustancialmente su durabilidad. La mezcla de fibra MFP y POFA produjo simultáneamente la mejor durabilidad de todos los hormigones estudiados. En comparación con el hormigón OPC normal, la penetración de cloruro de la mezcla con 20 % de POFA y 0,75 % de fibras de MFP disminuyó en aproximadamente 10 % después de 90 días. Además, en comparación con la mezcla de control, la resistencia eléctrica de la misma combinación aumentó aproximadamente un 80 % a la misma edad.
- La investigación microestructural de la matriz OPC mostró huecos dispersos a través de la estructura de la pasta. La morfología de la pasta de POFA reveló compuestos densos, amorfos e impermeables, con partículas de ceniza sin reaccionar que sirvieron de relleno para producir una

matriz densa. La densificación de la matriz con más productos de hidratación se relacionó con la mayor eficiencia de durabilidad de los compuestos de hormigón.

- Con la adición de fibras de MFP se redujo la penetración de cloruro en la muestra de hormigón mientras se elevó su resistencia eléctrica. Los especímenes reforzados pueden clasificarse como de “alta” resistencia contra la penetración de cloruro y la “baja” tasa de corrosión de la barra de refuerzo en función de las pruebas de penetración de cloruro y resistividad eléctrica de 90 días.

Aportes de los autores: todos los autores contribuyeron al artículo por igual. Conceptualización: H. M., S. P. N. y R. A.; metodología, A. A. K. E., A. M. M. y R. A.; *software* S. P. N. y R. A.; validación, H. M., A. A. K. E. y R. A.; análisis formal, H. M., A. M. M. y R. A.; investigación, H. A., A. M. M. y R. A.; recursos, H. M., A. M. M. y R. A.; curaduría de datos, H. M. y R. A.; preparación del borrador original por escrito, H. M., H. A. y R. A.; redacción-revisión y edición, H. M., A. A. K. E. y R. A.; visualización, H. M. y S. P. N.; supervisión, H. A. y A. A. K. E.; administración de proyectos, R. A. y S. P. N.; adquisición de fondos, H. M. y R. A. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Financiación: los autores agradecen al Deputyship for Research & Innovation, Ministerio de Educación de Arabia Saudí, por financiar este trabajo de investigación a través del proyecto número IF-PSAU-2021/01/18918.

Declaración de la Junta de Revisión Institucional: no aplica.

Declaración de consentimiento informado: no aplica.

Declaración de disponibilidad de datos: los datos presentados en este estudio están disponibles a petición del autor correspondiente.

Reconocimientos: los autores agradecen el apoyo técnico recibido de la Universidad Príncipe Sattam Bin Abdulaziz (Arabia Saudí) y Universiti Teknologi Malaysia.

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

Referencias

1. Sun, C.; Chen, Q.; Xiao, J.; Liu, W. Utilization of waste concrete recycling materials in self-compacting concrete. *Resour. Conserv. Recycl.* 2020, 161, 104930. [CrossRef]
2. Choudhary, J.; Kumar, B.; Gupta, A. Feasible utilization of waste limestone sludge as filler in bituminous concrete. *Constr. Build. Mater.* 2020, 239, 117781. [CrossRef]
3. Mohammadhosseini, H.; Yatim, J. M.; Sam, A. R. M.; Awal, A. A. Durability performance of green concrete composites containing waste carpet fibers and palm oil fuel ash. *J. Clean. Prod.* 2017, 144, 448-458. [CrossRef]
4. Siddique, R.; Singh, G. Utilization of waste foundry sand (WFS) in concrete manufacturing. *Resour. Conserv. Recycl.* 2011, 55, 885-892. [CrossRef]
5. Alaskar, A.; Alqarni, A. S.; Alfalah, G.; El-Sayed, A. K.; Mohammadhosseini, H.; Alyousef, R. Performance evaluation of reinforced concrete beams with corroded web reinforcement: Experimental and theoretical study. *J. Build. Eng.* 2021, 35, 102038. [CrossRef]
6. Mohammadhosseini, H.; Alyousef, R.; Poi Ngian, S.; Tahir, M. M. Performance evaluation of sustainable concrete comprising waste polypropylene food tray fibers and palm oil fuel ash exposed to sulfate and acid attacks. *Crystals* 2021, 11, 966. [CrossRef]
7. Gu, L.; Ozbakkaloglu, T. Use of recycled plastics in concrete: A critical review. *Waste Manag.* 2016, 51, 19-42. [CrossRef]
8. Sharma, R.; Bansal, P.P. Use of different forms of waste plastic in concrete-A review. *J. Clean. Prod.* 2016, 112, 473-482. [CrossRef]
9. Saikia, N.; de Brito, J. Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review. *Constr. Build. Mater.* 2012, 34, 385-401. [CrossRef]
10. Albano, C.; Camacho, N.; Hernández, M.; Matheus, A.; Gutiérrez, A. Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios. *Waste Manag.* 2009, 29, 2707-2716. [CrossRef]
11. Eriksen, M.; Christiansen, J.; Daugaard, A. E.; Astrup, T. Closing the loop for PET, PE and PP waste from households: Influence of material properties and product design for plastic recycling. *Waste Manag.* 2019, 96, 75-85. [CrossRef] [PubMed]
12. Faraca, G.; Astrup, T. Plastic waste from recycling centres: Characterisation and evaluation of plastic recyclability. *Waste Manag.* 2019, 95, 388-398. [CrossRef] [PubMed]
13. Hahladakis, J. N.; Iacovidou, E. An overview of the challenges and trade-offs in closing the loop of post-consumer plastic waste (PCPW): Focus on recycling. *J. Hazard. Mater.* 2019, 380, 120887. [CrossRef]

14. Eriksen, M.; Astrup, T. Characterisation of source-separated, rigid plastic waste and evaluation of recycling initiatives: Effects of product design and source-separation system. *Waste Manag.* 2019, 87, 161-172. [CrossRef] [PubMed]
15. Mohammadhosseini, H.; Alyousef, R.; Lim, N. H. A. S.; Tahir, M. M.; Alabduljabbar, H.; Mohamed, A. M.; Samadi, M. Waste metalized film food packaging as low cost and ecofriendly fibrous materials in the production of sustainable and green concrete composites. *J. Clean. Prod.* 2020, 258, 120726. [CrossRef]
16. Mahmood, R. A.; Kockal, N. U. Cementitious materials incorporating waste plastics: A review. *SN Appl. Sci.* 2020, 2, 1-13. [CrossRef]
17. Buller, A. S.; Abro, F. U. R.; Lee, K.-M.; Jang, S. Y. Mechanical recovery of cracked fiber-reinforced mortar incorporating crystalline admixture, expansive agent, and geomaterial. *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2019, 2019, 3420349. [CrossRef]
18. Liu, F.; Zhang, T.; Luo, T.; Zhou, M.; Ma, W.; Zhang, K. The effects of Nano-SiO₂ and Nano-TiO₂ addition on the durability and deterioration of concrete subject to freezing and thawing cycles. *Materials* 2019, 12, 3608. [CrossRef]
19. Yi, Y.; Zhu, D.; Guo, S.; Zhang, Z.; Shi, C. A review on the deterioration and approaches to enhance the durability of concrete in the marine environment. *Cem. Concr. Compos.* 2020, 113, 103695. [CrossRef]
20. Paul, S. C.; Van Zijl, G. P.; Šavija, B. Effect of fibers on durability of concrete: A practical review. *Materials* 2020, 13, 4562. [CrossRef]
21. Abro, F. U. R.; Buller, A. S.; Lee, K.-M.; Jang, S. Y. Using the steady-state chloride migration test to evaluate the self-healing capacity of cracked mortars containing crystalline, expansive, and swelling admixtures. *Materials* 2019, 12, 1865. [CrossRef] [PubMed]
22. Buller, A. S.; Abro, F. -U. -R.; Ali, T.; Jakhrani, S. H.; Ul-Abdin, Z. Stimulated autogenous-healing capacity of fiber-reinforced mortar incorporating healing agents for recovery against fracture and mechanical properties. *Mater. Sci.* **2021**, 39, 33-48. [CrossRef]
23. Alrshoudi, F.; Mohammadhosseini, H.; Md. Tahir, M.; Alyousef, R.; Alghamdi, H.; Alharbi, Y. R.; Alsaif, A. Sustainable use of waste polypropylene fibers and palm oil fuel ash in the production of novel prepacked aggregate fiber-reinforced concrete. *Sustainability* 2020, 12, 4871. [CrossRef]
24. Alnahhal, M. F.; Alengaram, U. J.; Jumaat, M. Z.; Alsubari, B.; Alqedra, M. A.; Mo, K. H. Effect of aggressive chemicals on durability and microstructure properties of concrete containing crushed new concrete aggregate and non-traditional supplementary cementitious materials. *Constr. Build. Mater.* 2018, 163, 482-495. [CrossRef]
25. Wang, W.; Shen, A.; Lyu, Z.; He, Z.; Nguyen, K. T. Fresh and rheological characteristics of fiber reinforced concrete-A review. *Constr. Build. Mater.* 2021, 296, 123734. [CrossRef]
26. Mujedu, K. A.; Ab-Kadir, M. A.; Ismail, M. A review on self-compacting concrete incorporating palm oil fuel ash as a cement replacement. *Constr. Build. Mater.* 2020, 258, 119541. [CrossRef]

27. Mohammadhosseini, H.; Alrshoudi, F.; Tahir, M. M.; Alyousef, R.; Alghamdi, H.; Alharbi, Y. R.; Alsaif, A. Durability and thermal properties of prepacked aggregate concrete reinforced with waste polypropylene fibers. *J. Build. Eng.* 2020, 32, 101723. [CrossRef]
28. Turk, K.; Bassurucu, M.; Bitkin, R. E. Workability, strength and flexural toughness properties of hybrid steel fiber reinforced SCC with high-volume fiber. *Constr. Build. Mater.* 2021, 266, 120944. [CrossRef]
29. Zhang, P.; Li, Q. Fracture properties of polypropylene fiber reinforced concrete containing fly ash and silica fume. *Res. Appl. Sci. Eng. Technol.* 2013, 5, 665-670. [CrossRef]
30. Li, Y.; Su, Y.; Tan, K. H.; Zheng, X.; Sheng, J. Pore structure and splitting tensile strength of hybrid Basalt-Polypropylene fiber reinforced concrete subjected to carbonation. *Constr. Build. Mater.* 2021, 297, 123779. [CrossRef]
31. Bao, H.; Yu, M.; Chi, Y.; Liu, Y.; Ye, J. Performance evaluation of steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete under supercritical carbonation. *J. Build. Eng.* 2021, 43, 103159. [CrossRef]
32. Almeida, A. E. F. S.; Tonoli, G. H. D.; Santos, S. F.; Savastano, H., Jr. Improved durability of vegetable fiber reinforced cement composite subject to accelerated carbonation at early age. *Cem. Concr. Compos.* 2013, 42, 49-58. [CrossRef]
33. Tang, W. L.; Lee, H. -S.; Vimonsatit, V.; Htut, T.; Singh, J. K.; Hassan, W. N. F. W.; Ismail, M. A.; Seikh, A. H.; Alharthi, N. Optimization of micro and nano palm oil fuel ash to determine the carbonation resistance of the concrete in accelerated condition. *Materials* 2019, 12, 130. [CrossRef] [PubMed]
34. Mohammadhosseini, H.; Alrshoudi, F.; Tahir, M.M.; Alyousef, R.; Alghamdi, H.; Alharbi, Y. R.; Alsaif, A. Performance evaluation of novel prepacked aggregate concrete reinforced with waste polypropylene fibers at elevated temperatures. *Constr. Build. Mater.* 2020, 259, 120418. [CrossRef]
35. Karahan, O.; Atis, C. The durability properties of polypropylene fiber reinforced fly ash concrete. *Mater. Des.* 2011, 32, 1044-1049. [CrossRef]
36. Teng, S.; Afroughsabet, V.; Ostertag, C. P. Flexural behavior and durability properties of high performance hybrid-fiber-reinforced concrete. *Constr. Build. Mater.* 2018, 182, 504-515. [CrossRef]
37. Wang, L.; Aslani, F. Electrical resistivity and piezoresistivity of cement mortar containing ground granulated blast furnace slag. *Constr. Build. Mater.* 2020, 263, 120243. [CrossRef]
38. Neville, A. M.; Brooks, J. J. *Concrete Technology*, 2da ed.; Longman Scientific & Technical: London, UK, 2010.
39. Lim, T. Y. D.; Teng, S.; Bahador, S. D.; Gjorv, O. E. Durability of very-high-strength concrete with supplementary cementitious materials for marine environments. *ACI Mater. J.* 2016, 113, 95-103. [CrossRef]

40. Zhang, M.; Li, H. Pore structure and chloride permeability of concrete containing nanoparticles for pavement. *Constr. Build. Mater.* 2011, 25, 608-616. [CrossRef]
41. Abro, F. U. R.; Buller, A. S.; Ali, T.; Ul-Abdin, Z.; Ahmed, Z.; Memon, N. A.; Lashari, A. R. Autogenous Healing of Cracked Mortar Using Modified Steady-State Migration Test against Chloride Penetration. *Sustainability* 2021, 13, 9519. [CrossRef]
42. Afroughsabet, V.; Biolzi, L.; Monteiro, P. J. The effect of steel and polypropylene fibers on the chloride diffusivity and drying shrinkage of high-strength concrete. *Compos. Part B Eng.* 2018, 139, 84-96. [CrossRef]
43. Kroehong, W.; Damrongwiriyanupap, N.; Sinsiri, T.; Jaturapitakkul, C. The effect of palm oil fuel ash as a supplementary cementitious material on chloride penetration and microstructure of blended cement paste. *Arab. J. Sci. Eng.* 2016, 41, 4799-4808. [CrossRef]
44. Alnahhal, A. M.; Alengaram, U. J.; Yusoff, S.; Singh, R.; Radwan, M. K.; Deboucha, W. Synthesis of sustainable lightweight foamed concrete using palm oil fuel ash as a cement replacement material. *J. Build. Eng.* 2021, 35, 102047. [CrossRef]
45. Kroehong, W.; Sinsiri, T.; Jaturapitakkul, C.; Chindapasirt, P. Effect of palm oil fuel ash fineness on the microstructure of blended cement paste. *Constr. Build. Mater.* 2011, 25, 4095-4104. [CrossRef]
46. Mohammadhosseini, H.; Alyousef, R.; Md. Tahir, M. Towards sustainable concrete composites through waste valorisation of plastic food trays as low-cost fibrous materials. *Sustainability* 2021, 13, 2073. [CrossRef]
47. Alrshoudi, F.; Mohammadhosseini, H.; Alyousef, R.; Tahir, M.M.; Alabduljabbar, H.; Mustafa Mohamed, A. The impact resistance and deformation performance of novel pre-packed aggregate concrete reinforced with waste polypropylene fibres. *Crystals* 2020, 10, 788. [CrossRef]

Publicaciones en otros medios

Publications in other Media

En esta edición se comparten dos trabajos realizados por investigadores de Cenipalma publicados en un medio internacional.

FEDEPALMA

Artículo

Galactooligosacáridos: aplicaciones tecnológicas alimentarias, beneficios prebióticos para la salud, modulación del microbioma y consideraciones de procesamiento

Galactooligosaccharides: Food Technological Applications, Prebiotic Health Benefits, Microbiome Modulation, and Processing Considerations

Autores: Mary Luz Olivares-Tenorio, David Orrego, Bernadette-Francisca Klotz-Ceberio, Carles Palanca, Marta Tortajada-Serra.

Publicado en: *JSFA Reports*, 2(12), 578-590. doi: 10.1002/jsf2.92

Resumen: los galactooligosacáridos (GOS) son oligosacáridos funcionales obtenidos enzimáticamente a partir de la lactosa. El interés por los GOS ha aumentado debido a sus beneficios para la salud como el fortalecimiento del sistema inmune y el mantenimiento de un microbioma intestinal sano.

Esta revisión contribuye al estado del arte del campo de los GOS, construyendo una visión integrada que destaca cuatro elementos clave que la industria alimentaria debería considerar a la hora de desarrollar alimentos más sanos y limpios: aplicaciones tecnológicas alimentarias de los GOS, beneficios prebióticos para la salud, modulación del microbioma en función de la estructura de los GOS y fundamentos del proceso de elaboración de los GOS.

Resultados: los GOS son una buena estrategia para la sustitución de grasas y azúcares, así como para la reducción de calorías, aumentar el valor nutricional, facilitar el procesamiento y mejorar la textura. Además, la

suplementación con GOS es un enfoque potencial para la mejora de la salud intestinal e inmunitaria, el cáncer, las lesiones renales, la obesidad, el tratamiento de la depresión y la ansiedad, y la mejora de la absorción de minerales, principalmente a través de la modulación del microbioma. No obstante, esta modulación depende de la concentración de GOS, la longitud de la cadena, el tipo y la orientación del enlace, y estos aspectos se moldean durante el procesamiento de los GOS.

Conclusiones: El proceso de desarrollo de productos alimenticios debe tener en cuenta todos los factores anteriores a la hora de seleccionar los GOS como ingredientes para conseguir las funcionalidades deseadas de forma eficaz. La bibliografía actual presenta discrepancias teniendo en cuenta la heterogeneidad estructural de las fuentes de GOS disponibles. La industria alimentaria necesita información más detallada sobre cómo apoyar la suplementación con GOS mediante el diseño y el desarrollo de alimentos.

Artículo

Intercepción de luz, rendimiento fotosintético y rendimiento del híbrido OxG interespecífico de la palma de aceite (*Elaeis oleifera* (Kunth) Cortés x *Elaeis guineensis* Jacq.) bajo tres densidades de siembra

Light Interception, Photosynthetic Performance, and Yield of Oil Palm Interspecific OxG Hybrid (*Elaeis oleifera* (Kunth) Cortés x *Elaeis guineensis* Jacq.) under Three Planting Densities

Autores: Hernán Mauricio Romero, Stephany Guataquira & Diana Carolina Forero

Publicado en: Plants 11, no. 9: 1166. <https://doi.org/10.3390/plants11091166>

Resumen: Las condiciones ambientales son cruciales para el crecimiento, el desarrollo y la productividad de los cultivos. Uno de los factores fisiológicos más importantes asociados a la producción de cultivos es la utilización de la radiación solar para el proceso de fotosíntesis, que determina la cantidad de asimilados disponibles para el crecimiento y el rendimiento de los cultivos. Se evaluaron 3 edades (4, 6 y 14 años) y 3 densidades de plantación (143, 128 y 115 palmas ha⁻¹) en un cultivo comercial de híbrido interespecífico *Elaeis oleifera* x *Elaeis guineensis*, Coari x La Mé. Se determinaron los patrones de interceptación de la luz y el rendimiento fotosintético. Se midieron el área foliar, el número de hojas y la radiación activa incidente y transmitida fotosintéticamente. También se midieron los índices fotosintéticos, la luz y el rendimiento. Se estimó el coeficiente de extinción del dosel (Kc) utilizando el modelo de Monsi y Saeki. Bajo las condiciones evaluadas, el valor promedio de Kc para las palmas de 4 años fue de 0,44; para el grupo de palmas de 6 años, el valor promedio fue de 0,40, y para las palmas de 14 años, el valor fue de 0,32, con coeficientes de determinación (R²) mayores a 0,8. Se observó un patrón asociado a la edad del cultivo, donde el Kc disminuyó en los grupos de palmas adultas. Los resultados mostraron un aumento del Kc a medida que disminuyó la densidad de plantación. No se observaron diferencias estadísticamente significativas entre densidades de plantación o edades en las curvas de luz y CO₂ con respecto a la fotosíntesis. El nivel foliar en el que se realizó la medición influyó en la fotosíntesis. De esta forma, los valores más altos de los parámetros de fotosíntesis se observaron en la hoja 17. El rendimiento del cultivo tendió a estabilizarse 8 años después de la siembra bajo 143 y 128 palmas por hectárea, pero 14 años después de la siembra, la producción de racimos de fruta fresca (RFF) seguía creciendo bajo 115 palmas por hectárea. Esto se debió en parte a una fuerte disminución de la producción observada bajo 128 palmas por hectárea, lo cual podría indicar que, en el largo ciclo de producción de los híbridos OxG, la densidad de plantación de 115 palmas por hectárea resultaría en una mayor producción acumulada de RFF. Además, los resultados mostraron que la densidad de plantación óptima para los híbridos del presente estudio sería de 120 palmas ha⁻¹, correspondiente a una distancia de plantación de 9,8 m entre plantas.

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 2, 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.