

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

PALMAS



Memorias de la
XIX Conferencia
Internacional sobre
Palma de Aceite
Tomo I

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

 **fedepalma**

CON EL APOYO DEL FONDO DE FOMENTO PALMERO



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

Esta publicación cuenta
con el patrocinio del
Fondo de Fomento Palmero

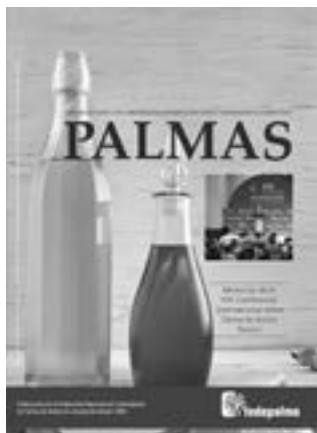


Foto portada: Esteban Mantilla. XIX Conferencia
Internacional sobre Palma de Aceite. Cartagena,
Colombia. 2018

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:
<http://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas>

Jens Mesa Dishington
Presidente Ejecutivo de Fedepalma

Alexandre Patrick Cooman
Director General de Cenipalma

Jorge Alonso Beltrán Giraldo
Director de Extensión

Alcibiades Hinestroza Córdoba
Gerente XIX Conferencia Internacional sobre Palma de Aceite

Alberto Vidal Gutiérrez
Responsable XIX Conferencia Internacional
sobre Palma de Aceite

Editor
Andrés Felipe García Azuero
Director de Planeación Sectorial y Desarrollo Sostenible

Comité Editorial
Jens Mesa Dishington
Boris Hernández Salame
Jaime González Triana
Juan Fernando Lezaca Mendoza
Tatiana Pretelt de la Espriella

Coordinación Editorial
Yolanda Moreno Munoz
Esteban Mantilla

Traducción
Carlos Arenas París

Diseño y Diagramación
Ximena Díaz Ortiz

Impresión
Javegraf

Cualquier utilización por terceros, de todo o parte del contenido de la revista Palmas, deberá ir acompañada de su nota bibliográfica y estar claramente referenciada (indicando en cada caso el nombre de la revista, volumen, número y año de edición).
Queda terminantemente prohibida la reproducción total o parcial de los artículos con fines comerciales.

CONTENIDO

5 PRESENTACIÓN

ACTOS DE INSTALACIÓN Y PLENARIAS

- 9 Innovación y sostenibilidad en la agroindustria de la palma de aceite en Colombia
Innovation and Sustainability in the Oil Palm Agroindustry in Colombia
Jens Mesa Dishington
- 19 El aceite de palma y las metas de desarrollo sostenible
Palm Oil and the Goals of Sustainable Development
Mahendra Siregar
- 21 Mensaje del Presidente de la República de Colombia, Iván Duque Márquez
Message by the President of the Republic of Colombia, Iván Duque Márquez
- 23 La palma de aceite, opción para el desarrollo sostenible e inclusivo del campo colombiano
The Oil Palm, Option for the Sustainable and Inclusive Development of the Colombian Countryside
Andrés Valencia Pinzón
- 27 Fedepalma entrega reconocimiento a José Ignacio Sanz Scovino
Fedepalma Gives to José Ignacio Sanz Scovino a Special Recognition

PLENARIAS

- 29 Bioeconomía y palma de aceite
Bioeconomy and Oil Palm
Day, L.
- 32 Reseña histórica, estado actual y perspectivas futuras de la agroindustria global de la palma de aceite
Historical Review, Current Status and Future Prospects of Global Oil Palm Agroindustry
Kushairi, A.
- 34 Atributos nutricionales y de salud del aceite de palma: una actualización
Nutritional and Health Attributes of Palm Oil: An Update
Khosla, P.
- 40 Reequilibrando la imagen del aceite de palma en Europa
Rebalancing the Image of Palm Oil in Europe
Claassen, F.
- 46 Oferta y demanda global: perspectivas de los aceites y las grasas en la próxima década
Global Supply and Demand: Outlook for Oils and Fats over the Next Decade
Fry, J.

MÓDULO 1: MANEJO DEL CULTIVO DE LA PALMA DE ACEITE Y SU MEJORAMIENTO GENÉTICO

SESIÓN 1: PLAGAS Y ENFERMEDADES

- 57 *Ganoderma*: progresos en investigación, manejo y retos a futuro
Ganoderma: Research advances, Management and Future Challenges
Sundram, S.
- 70 La enfermedad de manchas foliares por *Pestalotiopsis* en la palma de aceite endémica del Sudeste Asiático
Oil Palm Leaf Spot as Endemic Disease in Southeast Asia
Mahamooth, T.
- 77 Control biológico de insectos plaga de palma de aceite en Indonesia
Biological Control of Oil Palm Insect Pests in Indonesia
Priwiratama, H.
- 94 Perspectiva bioecológica de *Elaeidobius kamerunicus* en relación con el llenado de frutos de palma de aceite en Indonesia
Bio-ecological Perspective of Elaeidobius kamerunicus Related to Oil Palm Fruit Set in Indonesia
Prasetyo, A.
- 111 Desarrollo de un sistema de detección y conteo automático para *Metisa plana* Walker (Lepidoptera: Psychidae)
Development of an Automated Detection and Counting System for the Bagworms Metisa plana Walker (Lepidoptera: Psychidae)
Shariff, A.

SESIÓN 2: MEJORAMIENTO GENÉTICO

- 117 Desarrollo de nuevos cultivares de palma de aceite en Malasia con especial referencia a los protocolos para desarrollar y liberar un nuevo cultivar
Development of New Oil Palm Cultivars in Malaysia with Special Reference to Protocols in Developing and Releasing a New Cultivar
Kushairi-Din, A.
- 119 Mejoramiento para la resistencia a la Pudrición del cogollo
Breeding for Bud Rot Resistance
Durand-Gasselin, T.
- 121 Desarrollo de herramientas genómicas para el mejoramiento de palma de aceite. El proyecto OPGP
Development of Genomics Tools for Oil Palm Breeding. The OPGP Project
Billote, N.
- 130 Generación de ideotipos innovadores de palma de aceite mediante biotecnologías
Generating Innovative Oil Palm Ideotypes through Biotechnologies
Rival, A.

- 140 La polinización artificial con reguladores de crecimiento incrementa la producción de aceite en híbridos interespecíficos OxG
Artificial Pollination with Plant Growth Regulators Increases Oil Yields in Interspecific Hybrids OxG
Romero, H.

SESIÓN 3: MANEJO SOSTENIBLE DEL SUELO Y NUTRICIÓN DEL CULTIVO

- 142 El rol del reciclaje de la biomasa de palma de aceite en la salud del suelo de las plantaciones
The Role of Oil Palm Biomass Recycling on Soil Health in Oil Palm Plantations
Caliman, J.
- 144 Indicadores de rendimiento de nutrientes en palma de aceite
Nutrient Yield Indicators in Oil Palm
Oberthür, T.
- 158 Biodisponibilidad de boro derivado de tres fuentes de boro en dos tipos de suelo
Boron Bioavailability Derived from Three Sources in Two Soil Types of Boron
Barbier, M.
- 168 Aplicación del principio de centro de gravedad (centro geométrico-centroide) para la optimización de recorridos e inicio de operaciones en clúster de aplicación de fertilizante
Application of the Center of Gravity Principle (Geometric Center-Centroid) to Optimize Travel and Starting Times Using Fertilizer Application Clusters
Castro, S.
- 177 Secuestro de carbono para altos rendimientos de la palma de aceite
Sequestering Carbon for High Oil Palm Yields
Pulver, E.

SESIÓN 4: TECNOLOGÍAS DE MANEJO DEL CULTIVO

- 185 Métodos de inteligencia artificial (IA) para aplicaciones de teledetección de palma de aceite
Artificial Intelligence (AI) in Oil Palm Remote Sensing Applications
Mohd-Shafri, H.
- 194 EcoProMIS, el sistema de información de gestión de producción ecológica
EcoProMIS the Ecological Production Management Information System for Sustainable Palm Oil Production
Roelof, K.
- 204 Enfoques no invasivos para la evaluación y el monitoreo de enfermedades vegetales
Non-Invasive Approaches for Oil Palm Disease Assessment and Monitoring
Balasundram, S K.
- 220 Una década de investigación en teledetección de la enfermedad *Ganoderma* en Malasia
A Decade of Research on Ganoderma Disease with Remote Sensing in Malaysia
Noor-Maris, N.
- 231 El futuro de la mecanización en las plantaciones de palma de aceite (Experiencia en Malasia)
The Future in Oil Palm Plantation Mechanization (A Malaysian Experience)
Subramaniam, K.

Presentación

Colombia se ha convertido en referente en palma de aceite, siendo el primer productor de aceite de palma en América y el cuarto a nivel mundial. Fedepalma, como representante del gremio palmicultor colombiano, es fuente y difusor de información, y la Conferencia Internacional se ha posicionado como uno de los principales eventos a nivel mundial y particularmente en América. Muestra de ello es el éxito creciente que ha tenido a lo largo de sus 19 versiones.

Este importante encuentro técnico es realizado actualmente cada tres años por la Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite, Fedepalma, con el apoyo de la Corporación Centro de Investigación en Palma de Aceite, Cenipalma.

Bajo el enfoque “Innovación y sostenibilidad en palma de aceite, nutriendo personas y protegiendo el planeta”, la XIX Conferencia Internacional sobre Palma de Aceite superó todas las expectativas, con la presencia de más de 1.600 asistentes de diversos países, quienes durante tres días participaron en 66 conferencias ofrecidas por expertos nacionales e internacionales, que se destacan por su alto nivel de investigación y experiencia; y desde cada ámbito de conocimiento demuestran el compromiso del sector con una palmicultura económica, ambiental y socialmente responsable, y como transformador de los entornos donde se desarrolla esta actividad.

En consecuencia, en esta edición especial de la revista Palmas, se presentan los artículos de investigación de los trabajos presentados en el desarrollo de la Conferencia, con contenidos basados en el reconocimiento de las necesidades del sector, así como las innovaciones más recientes empleadas para afrontar los retos y oportunidades que ofrece el cultivo de palma de aceite, su producción y su comercialización.

La agenda académica inició con la instalación de la Conferencia, seguida del desarrollo de cinco sesiones plenarias con *keynote speakers* que abordaron temas de vanguardia e interés general para los participantes como los retos en materia de innovación y sostenibilidad; el pasado, presente y futuro de la palma de aceite; su importancia en la nutrición y salud humana; y el análisis del comportamiento y de los mercados del aceite.

Durante el segundo y tercer día, la agenda académica se desarrolló con tres módulos simultáneos con conferencias especializadas en temas de manejo del cultivo de palma de aceite, mejoramiento genético, plantas de beneficio, valor agregado, calidad, usos del aceite, sostenibilidad y entorno del mercado.

Fedepalma seguirá trabajando junto con Cenipalma, en el desarrollo de eventos de alto nivel investigativo. La próxima conferencia internacional se llevará a cabo en septiembre de 2021 en el Centro de Convenciones Cartagena de Indias, Colombia. Reciban desde ya, nuestra más cordial invitación.

Introduction

Colombia has become a world leader in oil palm. Fedepalma, as the representative of the Colombian oil palm growers, is a source and disseminator of information, and the International Conference is positioned as one of the main events worldwide and particularly in America. Proof of this is the growing success it has had throughout its 19 versions.

This important technical meeting is organized every three years by the National Federation of Oil Palm Growers of Colombia, Fedepalma, with the support of the Colombian Oil Palm Research Center, Cenipalma.

Under the motto "Innovation and sustainability in oil palm, nourishing people and protecting the planet," the 19th International Oil Palm Conference exceeded all expectations. Throughout the event, over 1,600 participants from all over the globe participated in over 66 conferences given by national and international experts who are famous for their high-level research and experience. From all fields of knowledge, they showed their commitment to an economically, environmentally, and socially responsible palm growing that transforms the environments where this activity takes place.

Therefore, in this special issue of Palmas, we present the research articles presented during the Conference. Its contents recognize both the needs of the sector and the most recent innovations used to face the challenges and opportunities of oil palm cultivation, production, and commercialization.

The academic agenda began with the inauguration of the Conference, followed by five plenary sessions with keynote speakers who addressed state of the art issues and topics of general interest for the participants. These included the challenges in innovation and sustainability, the past, present, and future of palm oil, the importance of palm oil for human nutrition and health, and an analysis of the oil market behavior.

During the second and third days, the academic agenda revolved around three simultaneous modules, with specialized conferences on the specialized management of oil palm crops, genetic improvement, mills, added value, uses of palm oil, sustainability, and market environment.

Fedepalma will continue to work together with Cenipalma in the development of high-level research events. The next International Conference will take place in September 2021 at Centro de Convenciones Cartagena de Indias, Colombia. You are cordially invited.



ACTO DE INSTALACIÓN Y PLENARIAS

Innovación y sostenibilidad en la agroindustria de la palma de aceite en Colombia

Innovation and Sustainability in the Oil Palm Agroindustry in Colombia



JENS MESA DISHINGTON

Presidente Ejecutivo de la
Federación Nacional de Cultivadores
de Palma de Aceite
Executive President of National
Federation of Oil Palm Growers

Reciban todos un caluroso saludo y una cordial bienvenida a la XIX Conferencia Internacional sobre Palma de Aceite. Nos reunimos una vez más en este espacio de encuentro de la palmicultura del continente americano, que nos permite compartir los principales avances y hechos relevantes de la agroindustria de la palma de aceite, y que además hace posible reencontrarnos con colegas y amigos. Esta conferencia tiene el honor de recibir hoy alrededor de 1.600 asistentes de 26 países y cuatro continentes.

Nos acoge una vez más la emblemática Cartagena de Indias, la “Heroica”, uno de los destinos turísticos

más importantes del país y con amplio reconocimiento a nivel mundial por su arquitectura, que conserva tanta historia, por sus hermosos paisajes, por las delicias de su gastronomía y por la calidez de su gente. Como bien recoge el encanto de la ciudad una conocida canción colombiana: “Noches de Cartagena que fascinan, con el suave rumor que lleva el mar, donde la brisa cálida murmura toda una serenata tropical”.

Durante los próximos tres días abordaremos, desde distintas perspectivas, dos conceptos fundamentales para este sector como son la innovación y la sostenibilidad, en virtud de los enormes retos y oportunidades

que enfrenta la agroindustria de la palma de aceite de América y a nivel mundial, en un mercado globalizado, interdependiente y cada vez más competitivo.

La palma de aceite en América

Sin ninguna duda, la palma de aceite, por ser la más eficiente de las oleaginosas, es una de las llamadas a atender la creciente demanda mundial de aceites vegetales y adquirir un protagonismo natural al ser ya la principal fuente de estos. América tiene grandes oportunidades para aumentar su participación en el mercado global del aceite de palma. Hoy día representa el 7 % de la producción mundial, siendo el segundo continente, con 4,9 millones de toneladas y un crecimiento de más del 100 % en la última década. Asia sigue siendo líder con el 88 %. Para 2018, se estima que la producción de Indonesia, primero a nivel mundial, será de aproximadamente 38 millones de toneladas; Malasia, segundo, con 21 millones; Tailandia, tercero, con 2,8 millones, mientras en Colombia, principal productor de América y cuarto mundial, se esperan 1,6 millones. Así mismo, América Central y del Sur han tenido una dinámica de crecimiento importante en su producción de aceite de palma. En la actualidad, Suramérica contribuye con el 60 % de la producción del continente, en tanto que Centroamérica, que ha aumentado su participación, aporta el restante 40 % (Figura 1).

Sin embargo, la región sigue siendo deficitaria, lo que representa una gran oportunidad para mejorar la colocación del aceite de palma de origen americano al interior de los países productores y en el resto del continente, como es el caso de los Estados Unidos, que lo

viene demandando de manera creciente. Si bien hay un reto grande en cuanto a competir con los grandes productores asiáticos para acceder a este mercado, los palmiticultores latinoamericanos podemos llegar a aprovechar nuestras ventajas en términos de localización, calidad y, por qué no, de sostenibilidad. Si logramos incrementar el consumo per cápita de aceite de palma de América, de 5,1 kg al promedio mundial de 9,1 kg, esto significaría un aumento en el consumo de 3,9 millones de toneladas.

Es importante no perder de vista el gran desafío que tiene el aceite de palma por cuenta de la mala imagen y de las campañas detractoras, en gran medida en Europa, pero que también están permeando otros mercados, incluso en los países productores. Bajo unas consideraciones de índole ambiental, social y del producto, se están fortaleciendo cada vez más los movimientos en contra del aceite de palma, al punto de que, si no unimos fuerzas y tomamos acciones contundentes, se perderán mercados de gran relevancia, lo que llevaría a una reestructuración de los flujos del comercio mundial, que seguramente comprometerían el futuro económico de muchos productores.

Es claro que como países productores estamos llamados a contarle al mundo los enormes beneficios y cualidades del aceite de palma, así como el aporte de esta agroindustria a la superación de la pobreza y al progreso de miles de agricultores. Tenemos un producto maravilloso y debemos posicionar su consumo en América. Al final de esta jornada, tendremos la oportunidad de compartirles lo que está haciendo Colombia en este sentido: el aceite de palma es natural,

Figura 1. Producción de aceite de palma por continente.

Fuente: Oil World Annual (2017).



es saludable, es vida. Es por esto que quiero reiterar a nuestros colegas de América Latina la importancia de impulsar la consolidación del Consejo Latinoamericano de Cultivadores y Productores de Aceite de Palma, ConLAPalma, para que con una institucionalidad regional fortalecida, logremos sinergias para la defensa y el posicionamiento de nuestro aceite de palma.

De igual manera, la región debe articular esfuerzos, siendo de la mayor relevancia instar a los gobiernos de cada uno de los países productores de América a adherirse a la iniciativa intergubernamental del Consejo de Países Productores de Aceite de Palma (CPOPC, por sus siglas en inglés).

La palma de aceite en Colombia

Volvamos la mirada ahora hacia Colombia, que conserva su lugar como el país líder en la producción de aceite de palma en América, contribuyendo con 34 %

en la región y 2,4 % a nivel mundial. En la última década, la producción colombiana ha crecido a una tasa promedio de 9,2 % y en 2017 alcanzó un crecimiento récord de 42 % respecto al año anterior, lo que refleja su gran dinamismo (Figura 2). Actualmente, la producción de los aceites de palma y de palmiste supera los 1,7 millones de toneladas anuales y, con la maduración del área ya sembrada, esperamos muy pronto superar los 2 millones de toneladas.

En 2017, el valor de la producción palmera en Colombia, que suma el aceite de palma crudo y la almendra de palma, fue de USD 1,2 billones (Figura 3). Esto lo ubicó, a nivel país, como el segundo producto dentro de los cultivos permanentes y en el sexto renglón en generación de valor en el sector agrícola. De acuerdo con estimaciones de Fedepalma, esta producción logró una participación del 11 % en el PIB agrícola colombiano. En cuanto al área sembrada, el cultivo de la palma de aceite en Colombia abarca más

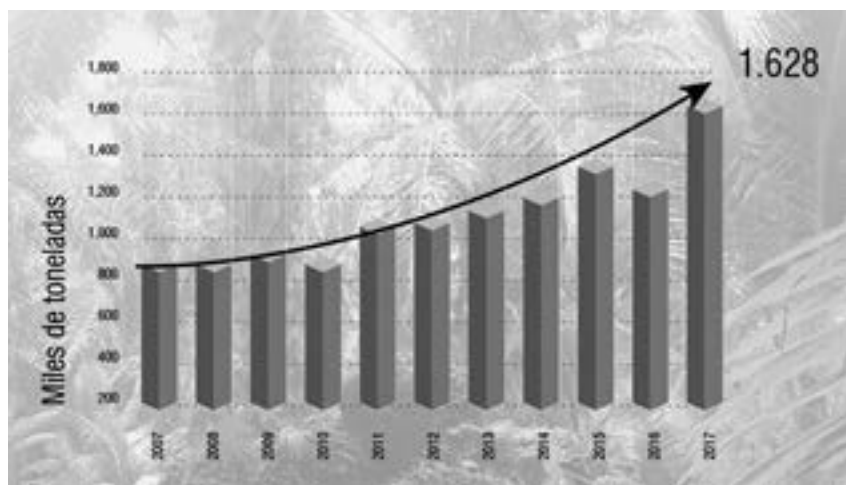


Figura 2. Comportamiento de la producción de aceite de palma en Colombia (2007-2017).



Figura 3. Comportamiento del precio internacional del aceite de palma.

Fuente: Reuters.

de 530 mil hectáreas. Según el Censo Nacional Agropecuario del Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas, DANE, realizado en 2015, la palma de aceite es el segundo cultivo con mayor extensión en área sembrada en Colombia, después del café.

Hoy día, el sector palmero colombiano exporta más de la mitad de su producción, siendo la Unión Europea su principal destino. En 2017 ocupó el quinto lugar en el ranking de productos agropecuarios de exportación y fue el segundo con mayor aporte al crecimiento de las exportaciones de productos agropecuarios, alimentos y bebidas. Esta realidad pone de presente que el futuro de nuestro sector estará cada vez más enfocado en los mercados externos, lo que nos impone retos adicionales que debemos superar en muy corto tiempo.

Si bien estas cifras ilustran la dinámica que ha tenido este sector en los últimos años, no podemos dejar pasar la difícil coyuntura económica por la que atraviesa la palmicultura colombiana, que se explica, primordialmente, por los siguientes factores.

El primero, la reducción en la producción de los aceites de palma, que para 2018 fue de 12 %; esto asociado en gran medida a razones climáticas. El segundo, la caída significativa de los precios internacionales, que han disminuido 20 % en lo corrido del año. El tercero, explicado por la política errática del Gobierno Nacional en materia de biocombustibles, lo que se ha reflejado en la lenta consolidación de la mezcla de biodiésel y en las confusas señales de precios, que no siguen al mercado y que han generado grandes pérdidas de ingresos para el sector. Por último, está el incremento desmedido de las importaciones, principalmente de Ecuador, que ha forzado a aumentar nuestras exporta-

ciones, impactando en el ingreso del sector. Lo anterior se relaciona con el hecho de que continuamos con una tasa de cambio revaluada que afecta la competitividad de muchos productos del agro colombiano, a lo que se suman otras distorsiones tributarias que favorecen el ingreso desordenado de aceite de palma a un mercado totalmente excedentario como el colombiano.

Este panorama pone de presente la importancia de contar con políticas públicas que generen un entorno competitivo y confiable para el desarrollo de la agroindustria de la palma de aceite, que acompañen los esfuerzos que vienen realizando los palmicultores en términos de la sostenibilidad social, ambiental y económica. De igual manera, es claro que, frente a la gran volatilidad del mercado, los productores debemos estar mejor organizados, con un enfoque empresarial y generando capacidades para enfrentar los ciclos de precios del negocio.

Compromiso con la sostenibilidad

En cuanto a la sostenibilidad social, la Primera Gran Encuesta del Empleo en el Sector Palmero realizada por Fedepalma y el DANE en 2017, arrojó resultados que posicionan al sector palmero como uno de los mayores generadores de empleo formal y de calidad en nuestro campo. Los datos muestran un nivel de formalidad en el empleo directo de 82,4 % y un ingreso promedio de 1,5 veces el salario mínimo mensual. Estas condiciones son superiores a las que predominan en el campo colombiano, en el que la informalidad está alrededor del 86 %. El total de empleos generados por esta agroindustria, entre directos e indirectos, es de 170 mil (Figura 4).

Figura 4. Principales resultados de la Primera Gran Encuesta del Empleo en el Sector Palmero.

Fuente: Fedepalma y DANE (2016).



Por otra parte, el sector palmero colombiano también es ejemplo de negocios inclusivos. De los más de 6 mil palmicultores, alrededor de 5 mil, poco más del 80 %, son pequeños productores. Buena parte de ellos forman parte de casi 140 modelos asociativos y de negocios inclusivos en los que confluyen pequeños, medianos y grandes productores. Estos negocios han permitido que los pequeños productores mejoren sus ingresos y su calidad de vida; accedan más fácilmente al crédito y a los incentivos; incrementen su capacidad de negociación y de comercialización, y optimicen su organización y sus capacidades empresariales.

Estas condiciones de la agroindustria han contribuido significativamente a la superación de la pobreza a nivel rural. No sobra recordar que, según un estudio realizado en 2016 por el Departamento Nacional de Planeación, DNP, al comparar los municipios más afectados por el conflicto armado y donde existe el cultivo de palma de aceite, frente a los municipios con el mismo nivel de conflicto pero que no tienen estos cultivos, el ingreso per cápita de los primeros es superior en 30 % al de los segundos (Figura 5). A esto el DNP le llamó el Dividendo Social de la Palma. Es así que tanto el Gobierno como organismos multilaterales y ONG vinculados a la búsqueda de soluciones para el posconflicto, consideran que la palma de aceite es uno de los cultivos con mayor potencial y oportunidades para la sustitución de actividades y siembras ilícitas, y la generación de ingresos estables para las poblaciones altamente afectadas por el conflicto.

En materia ambiental, hay evidencia de que el cultivo de la palma de aceite se ha desarrollado en Colombia con un impacto mínimo en deforestación. Así lo demuestran estudios realizados por las univer-

sidades de Duke y de Puerto Rico, en los que analizaron dicho impacto para la expansión del cultivo en los periodos 1989-2013 y 2001-2014. A finales de 2017, para ratificar su compromiso con la cero deforestación, Fedepalma y varios de sus principales afiliados suscribieron el Acuerdo de Voluntades para la Deforestación Cero en la Cadena de Aceite de Palma en Colombia, al que se unieron también el Gobierno Nacional y diversas ONG, bajo el auspicio del Reino Unido, Alemania y Noruega.

Los palmicultores colombianos tienen la oportunidad de cumplir este compromiso y seguir desarrollando sus plantaciones con un uso sostenible del suelo. Colombia cuenta con una frontera agrícola de más de 40 millones de hectáreas, de las que no alcanza a aprovechar un 20 %. En lo concerniente a la palma de aceite, la Unidad de Planificación Rural Agropecuaria, UPR, identificó que dentro de esa frontera existen más de 23 millones de hectáreas con diferentes grados de aptitud para desarrollar comercialmente el cultivo sin deforestar (Tabla 1), de las cuales 5,2 millones tienen una aptitud alta (Figura 6).

Este cultivo, además, ha mostrado que puede ser compatible con la conservación de la biodiversidad. Recientemente finalizamos el proyecto “Paisaje Palmero Biodiverso, PPB, financiado por el Fondo para el Medio Ambiente Mundial de Naciones Unidas (GEF, por su sigla en inglés), que fue ejecutado por Fedepalma en asocio con Cenipalma, el Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF) y el Instituto Alexander von Humboldt. Este tuvo lugar entre 2012 y 2018 y nos dejó valiosos instrumentos y experiencias exitosas para el manejo de áreas con alto valor de conservación en regiones palmeras, la planificación

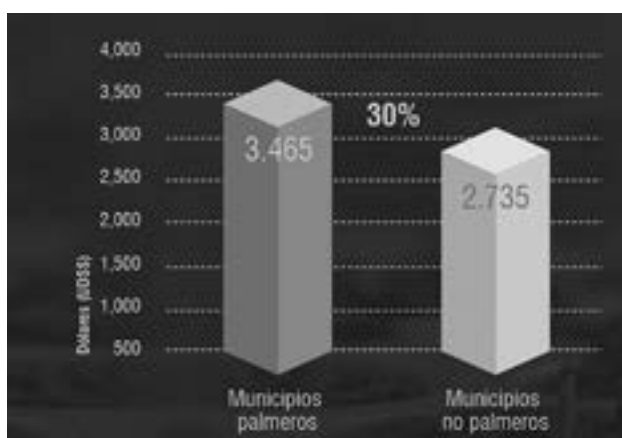


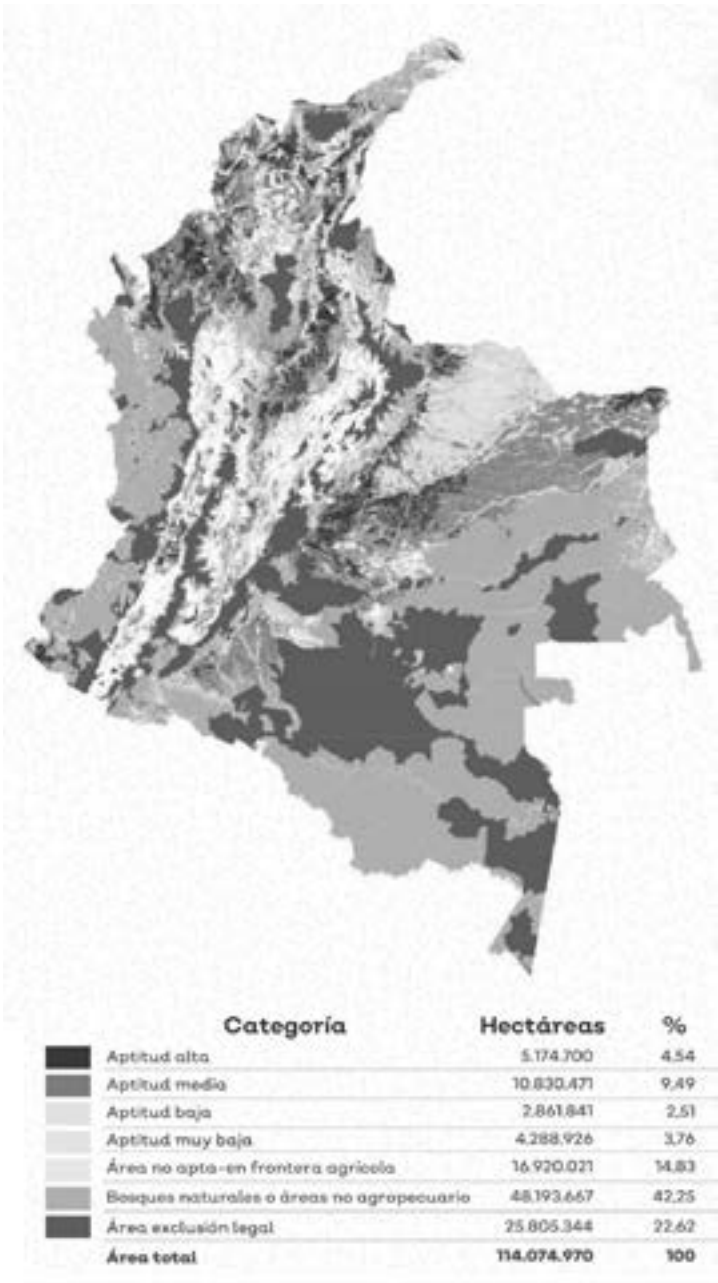
Figura 5. Valor agregado per cápita (sin minas y energía) de los municipios en conflicto.

Fuente: DNP (2016).

Tabla 1. Área con diferentes grados de aptitud para el desarrollo de cultivos de palma de aceite en Colombia.
Fuente: UPRA.

| Aptitud | Área (ha) | % |
|-----------------|------------|------|
| Alta | 5'208.811 | 4,6 |
| Media | 10'982.364 | 9,6 |
| Baja | 3'205.995 | 2,8 |
| Muy baja | 4'266.501 | 3,7 |
| No apto técnico | 74'168.698 | 65,0 |
| No apto legal | 16'242.601 | 14,2 |

Figura 6. Distribución geográfica de las áreas aptas para el cultivo de palma de aceite en Colombia.
Fuente: Sispa con datos de la UPRA.



y el diseño de proyectos palmeros en armonía con su entorno natural y la adopción de buenas prácticas con enfoque agroecológico, por mencionar algunos. El reto ahora está en difundir estas herramientas y replicar los mensajes en las distintas zonas palmeras del país, con el concurso activo de los Núcleos Palmeros e involucrando otros actores del orden regional.

Ahora bien, la sostenibilidad social y ambiental necesariamente tienen que ir acompañadas de la económica y, en este sentido, los productores deben esforzarse continuamente por aumentar su eficiencia. La palmicultura colombiana ha venido de nuevo aumentando su productividad promedio, que alcanzó 3,8 toneladas de aceite de palma crudo por hectárea en 2017, superando levemente la media mundial. Sin duda, este indicador es un resultado positivo que capitaliza muchos aprendizajes y conocimiento de más de cinco lustros de investigación y extensión, así como de la organización de los productores alrededor de los conglomerados que hemos denominado Núcleos Palmeros.

Sin embargo, existen aún retos importantes en cuanto al cierre de brechas de productividad entre los distintos tipos de productores, en especial de los pequeños palmicultores. Para 2023, nos hemos trazado la meta de alcanzar una productividad promedio de cinco toneladas de aceite de palma por hectárea, pues sabemos que tenemos la tecnología para hacerlo, pero falta todavía adoptarla plenamente por parte de muchos productores. Para avanzar en dicho propósito, no podemos perder de vista que este es un negocio que debe estar respaldado por un modelo empresarial y agroindustrial incluyente, en el que prime el enfoque gerencial y de mercado, que permita lograr economías de escala, eficiencias y una mayor agregación de valor.

Los logros alrededor de la sostenibilidad, han permitido que los palmicultores colombianos sigamos avanzando en el camino de certificarse en estándares sostenibles. A agosto de 2017, once empresas con planta de beneficio, que contribuyen con el 14 % de la producción de aceite de palma del país, ya contaban con la certificación RSPO. Están por certificarse otras 23 y algunas han avanzado en otras certificaciones como ISCC y Rainforest Alliance, por lo que nuestra meta es que en menos

de dos años el 50 % del aceite de palma colombiano tenga una certificación de sostenibilidad.

Y cierro este aparte de la sostenibilidad resaltando que, en junio de 2017, dimos inicio al Programa de Aceite de Palma Sostenible de Colombia. Este va a demandar el concurso, el esfuerzo y los recursos de distintos actores públicos y privados, de manera que se puedan articular las acciones de todos los *stakeholders* del ecosistema de la palma de aceite y así poder aprovechar la oportunidad de posicionar frente a los colombianos y al mundo nuestra producción de aceite de palma sostenible.

Esta evolución del sector palmero colombiano ha ido de la mano de una institucionalidad que se ha fortalecido con los años. Fedepalma, con más de 55 años de existencia, con el trabajo mancomunado de sus afiliados, de su Junta Directiva y de todo su equipo, ha llevado a que sea reconocida como uno de los gremios agropecuarios más sólidos y representativos del país.

Uno de los principales hitos a nivel institucional para el sector, ha sido la creación y consolidación del Centro de Investigación en Palma de Aceite, Cenipalma, que cuenta ya con más de 25 años de existencia y se ha posicionado como uno de los centros de investigación líderes en el sector agropecuario colombiano y como un referente en tecnologías para la palma de aceite y su procesamiento a nivel nacional e internacional.

Compromiso con la innovación

Cenipalma se creó en su momento atendiendo la necesidad de encontrar soluciones a la difícil problemática sanitaria del cultivo, asociada en gran medida a la Pudrición del cogollo (PC). Esta enfermedad ha llevado a que Colombia haya perdido alrededor de 100 mil hectáreas de palma en lo corrido de este siglo, y hoy día sigue siendo un reto importante para nuestro sector. Sin embargo, y aunque la problemática aún existe, en estos cinco lustros, Cenipalma ha alcanzado logros de gran magnitud, entre los que se destacan la identificación de *Phytophthora palmivora* como agente causal de la enfermedad, instrumentos para facilitar la detección oportuna y protocolos de manejo, importantes avances en la búsqueda de

genes de resistencia, y la identificación y el tratamiento de los factores asociados, como lo son temas de nutrición y de agua.

Los avances alrededor de esta enfermedad son una clara muestra de la importancia de la investigación e innovación tecnológica y de que sus resultados pueden llegar a generar impactos de gran envergadura. Esto fue bien evaluado y documentado en un estudio realizado en 2017 por el Centro de Estudios Regionales Cafeteros y Empresariales, CRECE, que encontró que los beneficios obtenidos son significativamente mayores a los costos que ha asumido el sector: por cada peso que los palmicultores han invertido en la lucha contra la PC han recibido tres pesos de retorno. Esta cifra de beneficio-costeo es un estímulo, no solo para que el sector palmero colombiano siga apostándole a la ciencia, la tecnología y la innovación, sino para que nuestros colegas palmicultores de América se comprometan a apoyar este tipo de iniciativas en sus propios países, lo que demanda esfuerzos colectivos y visión de largo plazo. Para el caso colombiano, por casi un cuarto de siglo, los palmicultores han realizado aportes significativos al Fondo de Fomento Palmero, más recientemente por el 1,5 % del valor de sus ventas brutas, de los que se han destinado tres de cada cuatro pesos a los programas de investigación y extensión. Esto suma alrededor de USD 120 millones en poco menos de 25 años.

Ahora bien, el rol de Cenipalma no se ha limitado a la búsqueda de soluciones para la PC. Por supuesto, se ha orientado a apoyar el conocimiento y manejo de otras enfermedades y plagas que azotan a la palma de aceite. Podemos mencionar, a modo de ejemplo, los avances en materia del Manejo Integrado de Plagas con tecnologías que involucran el uso de entomopatógenos, que además de contribuir al control de plagas ofrecen alternativas más sostenibles ambientalmente.

De igual manera, se ha avanzado en la generación de conocimientos y tecnologías que aumenten la productividad de la agroindustria. En fitomejoramiento, se han logrado resultados claves en la identificación de genes de resistencia a enfermedades y a las condiciones adversas al cultivo. Después de dos décadas de investigaciones, Cenipalma está ya en la etapa final para la obtención de estos nuevos materiales. Se ha ganado también amplio terreno en el

conocimiento del manejo del híbrido OxG. Somos conscientes de que la producción a partir de estos materiales es un negocio distinto, pero también de que tiene un gran potencial para posicionar el aceite de palma OxG alto oleico como el aceite de las Américas. Y sea esta la oportunidad para resaltar un hito de la investigación de Cenipalma, fruto del trabajo de más de cinco años, en materia del híbrido OxG: el desarrollo de un fitorregulador que cambiará drásticamente la productividad de este cultivo, gracias a su uso en la polinización artificial, y cuyo impacto económico estimado hoy puede alcanzar los 50 millones de dólares anuales. En unas pocas horas podrán conocer más de esta tecnología.

Todo esto apunta al desarrollo de mejores prácticas para cultivos de alto rendimiento. Con la tecnología disponible, hoy en día es posible pensar en plantaciones que superen las 30 toneladas de racimos de fruta fresca por hectárea, lo que equivale a siete toneladas o más de aceite de palma crudo por hectárea, por año.

Los logros en cuanto al manejo del cultivo, se han venido complementando con tecnologías orientadas a mejorar la productividad en las plantas de beneficio. Un claro ejemplo es la generación de una metodología, en la que hemos venido trabajando, para la medición en línea del potencial de aceite que permitirá valorar de manera precisa la calidad de la fruta procesada, y se podrá constituir en un criterio de compra objetivo que reconozca los esfuerzos realizados en plantación.

Gracias al apoyo técnico de Cenipalma, el sector palmero colombiano pudo gestionar exitosamente la creación del Programa Nacional de Biodiésel de Palma, siendo hasta el momento el más importante en su género en América. Este ha sido una pieza clave para el crecimiento del cultivo y para mejorar las condiciones de comercialización. Hoy en día, Colombia consume más de 450 mil toneladas de aceite de palma crudo para la producción del biocombustible. En este sentido, también es una invitación a nuestros colegas de Latinoamérica para que vean en los biocombustibles una oportunidad de crecer y de contribuir a la sostenibilidad del continente. Si los países latinoamericanos tuvieran mandato de mezcla de biodiésel, por ejemplo, de B10, se generaría

una demanda adicional de 2,7 millones de toneladas de aceites vegetales. Sin embargo, el desarrollo del mercado del biodiésel de palma es solo una de las múltiples opciones de agregación de valor. La palma de aceite tiene todas las posibilidades de desarrollar su cadena de valor bajo los conceptos de la economía circular y de la bioeconomía. Esta agroindustria puede estar presente en ocho clústeres (petroquímica, transporte, elementos de oficina, textiles y confecciones, aseo y hogar, cuidado personal, entretenimiento, y alimentos y bebidas), uno más que los que abarca el petróleo. A esto se suma la posibilidad de generación de energía eléctrica.

Fedepalma y Cenipalma han trabajado en crear y adaptar tecnologías para el uso óptimo de la biomasa como fuente de energía, para el consumo de las plantas de beneficio y para las comunidades en las zonas palmeras. Nuestro potencial actual de generación de energía eléctrica, con las 67 plantas de beneficio que operan en el país, se estima en los 340 MW. A futuro, con la capacidad de proceso y el crecimiento esperado de la producción de fruto de palma, y por ende de la biomasa, el potencial de generación de energía eléctrica de la palmicultura colombiana podría superar los 500 MW (Figura 7).

Por otra parte, hemos avanzado en evaluar otras alternativas para el aprovechamiento de la biomasa,

con opciones de biorrefinería, como la producción de pélets para aumentar la eficiencia de la generación de energía en las plantas de beneficio, y la producción de biolíquidos y biocarbón. En cuanto a usos del aceite de palma, Colombia está progresando en el desarrollo de bioasfaltos que incorporan aceite de palma crudo. Hoy en día contamos con algunos tramos de prueba construidos con nuevas mezclas tibias. También hay avances en la producción de vitaminas y fitonutrientes.

La búsqueda de la sostenibilidad y de la innovación ha llevado a que la agroindustria de la palma de aceite colombiana contribuya con 12 de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas. Los impactos mencionados en términos de generación de empleo formal y digno, de negocios inclusivos y de incremento del ingreso de las regiones, le apuntan al fin de la pobreza; a trabajo decente y desarrollo económico; a reducción de la desigualdad, y a paz, justicia e instituciones sólidas (Figura 8).

En lo ambiental, el uso sostenible y eficiente que se ha dado a la tierra, el respeto por la biodiversidad y por los ecosistemas, y las mejores prácticas de producción, le aportan a producción y consumo responsables; a acción por el clima y a vida de los ecosistemas terrestres.

Los logros en agregación de valor, en temas como nuevos usos y productos, en la producción de biodié-

Figura 7. Potencial de generación de energía eléctrica con biomasa residual de palma.

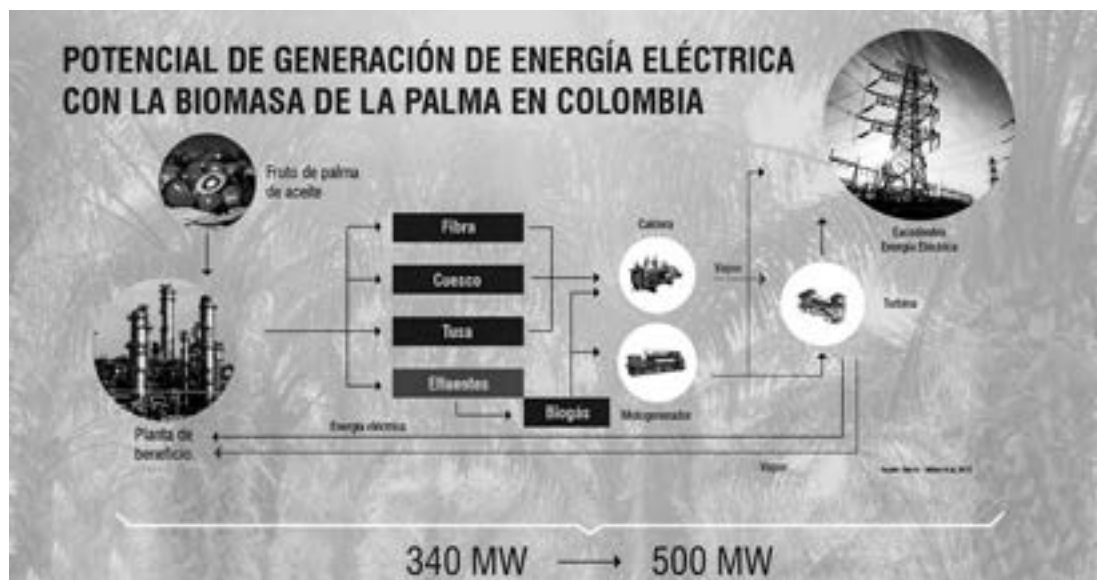


Figura 8. Contribución del sector palmero a los Objetivos de Desarrollo Sostenible*.

*Aquellos objetivos a los que contribuye el sector, se presentan de mayor tamaño.



sel y en la generación de energía eléctrica a partir de la biomasa, contribuyen con energía asequible y no contaminante; industria, innovación e infraestructura, y ciudades y comunidades sostenibles. A esto se suma el aporte que el aceite de palma, gracias a las propiedades nutricionales y funcionales que ustedes bien conocen, hace a la lucha por lograr hambre cero, y a salud y bienestar de la población.

Si bien nos entusiasman los adelantos que hemos resaltado, a los que ha contribuido el gremio, tenemos por delante muchos retos.

El lema de esta conferencia “Innovación y sostenibilidad en palma de aceite: nutriendo personas y protegiendo el planeta”, pone de presente la simbiosis que debe haber entre estos dos conceptos y la importancia de seguir generando conocimientos y tecnologías que permitan desarrollar la agroindustria de la palma de aceite de forma sostenible.

No podemos perder de vista enfoques como adaptación al cambio climático, economía circular y bioeconomía. Debemos ser innovadores, disruptivos y realizar esfuerzos importantes para aprovechar el potencial que tiene la palma de aceite. Pero esto demanda el compromiso de los productores y de sus respectivos gobiernos, que se debe materializar en la disponibilidad de recursos para hacer investigación y desarrollo, y en el fortalecimiento de una institucionalidad que la respalde.

En Colombia, Cenipalma ha construido un activo muy importante para el sector palmero, que yo resumiría en una palabra: confianza. Esto es algo que, por nuestra experiencia, podemos decir que puede hacer la diferencia en el crecimiento sostenible de la palmiticultura de un país.

Por último, quisiera compartirles un aparte del informe del Índice Global de Innovación de 2017, del Johnson College of Business de la Universidad de Cornell, que plasma muy bien la importancia de la innovación en el agro y que está en la línea del tema central del evento:

“La innovación no está limitada a las economías más avanzadas. Tampoco está limitada a los sectores de alta tecnología. La innovación se ha vuelto hoy un fenómeno global, que afecta todos los sectores de la economía, incluyendo el de agricultura y alimentos, que está entre los sectores más antiguos y básicos. Alimentar el mundo, contribuyendo a proteger el ambiente y ofreciendo nutrición balanceada y de calidad a las crecientes poblaciones, con diferentes estilos de vida y patrones de consumo, implica un desafío complejo. La innovación juega un rol clave en la orientación de este desafío”.

Esperamos que la agenda que les tenemos preparada en esta XIX Conferencia Internacional sobre Palma de Aceite sea de su agrado y provecho.

Muchas gracias y bienvenidos todos.

El aceite de palma y las metas de desarrollo sostenible*

Palm Oil and the Goals of Sustainable Development

* Texto extraído del discurso de instalación de Mahendra Siregar, Director Ejecutivo del Consejo de Países Productores de Aceite de Palma (CPOPC)



MAHENDRA SIREGAR

Director Ejecutivo del Consejo de
Países Productores de Aceite de Palma
(CPOPC)
Executive Director of
Council of Palm Oil Producing
Countries

Estamos en un momento crítico para la industria de la palma de aceite a nivel global, y se podría decir que en la situación más decisiva para un gran futuro de la palma de aceite como la mejor solución a una necesidad creciente del mundo.

El Consejo de Países Productores de Aceite de Palma, CPOPC, es una organización internacional cuyos miembros son los gobiernos de aquellas naciones que cultivan y producen aceite de palma. Es relativamente nueva y ha sido efectiva desde hace dos años. Actual-

mente tiene dos miembros: Malasia e Indonesia, que producen el 86 % de la producción mundial de aceite de palma. Próximamente daremos la bienvenida a Colombia como el tercer miembro de este consejo.

A pesar de que el CPOPC está confirmado por dos miembros, ha podido trabajar en conjunto con otros países productores de aceite de palma. En Bruselas, por ejemplo, se han llevado a cabo varias reuniones entre los embajadores de estos países y diferentes entidades de los gobiernos europeos, expresando las

preocupaciones sobre las medidas discriminatorias de la Unión Europea en cuanto a la energía renovable y sus criterios respecto al uso de las tierras destinadas al cultivo palma de aceite. Los embajadores también dirigieron una carta al Parlamento Europeo, la Comisión Europea y el Consejo Europeo sobre este tema, y acordaron seguir monitoreando detenidamente la situación para reportar a los gobiernos respectivos, y de nuevo de manera conjunta, responder ante cualquier desarrollo no deseado en la materia.

Así mismo en Singapur, durante el encuentro de los ministros de relaciones exteriores de Asia en 2018, se convino hacer una declaración conjunta sobre el aceite de palma, que sigue afrontando tratamientos injustos y discriminación en diferentes partes del mundo. Esta es la tercera vez en diez meses que Asia se ha puesto de acuerdo para adoptar una posición común sobre el asunto.

La anterior es una línea de acción más, sabiendo que Asia ha adoptado una postura conjunta durante más de 50 años. Estamos en un momento donde un grupo de países ha asumido medidas injustas hacia el aceite de palma. Desde luego es poco probable que cualquier nación o grupo de países pongan en riesgo su relación con Asia, sobre todo si nosotros tomamos unos 10 o 15 años como prospectiva de la dinámica de la región comparada con la situación global que presenta una incertidumbre sobre el mismo tema. Ante la Organización Mundial del Comercio, Indonesia, Malasia y otros países productores y sus misiones, han elevado el problema pidiendo y exigiendo a la delegación de la Unión Europea una respuesta. Es claro que el aceite de palma se ha convertido en la prioridad número uno de Indonesia y Malasia, que actualmente se encuentran alejadas de la Unión Europea, solicitando respectivamente un artículo sobre su tratado de libre comercio y un borrador del acuerdo con la UE que debería garantizar la no discriminación contra el aceite de palma. Mientras tanto, la aerolínea privada más importante en Indonesia ha congelado todas las compras de cientos de aviones Airbus hasta que no haya dicha discriminación.

Entonces ¿que está mal con el aceite de palma? De hecho el mayor error es hacerse esa misma pregunta. Obviamente como todos los cultivos, no es perfecto,

pero ninguno estaría en desacuerdo en decir que el aceite de palma es el más sostenible. Y en ese contexto este es el aceite que va a soportar, no solamente a los países productores, sino que de manera continua va a incrementar la demanda en el mundo, sobre todo en países en desarrollo dado que serán más del 95 % del mercado del aceite de palma en el 2030, año en que las Naciones Unidas y todos sus miembros se comprometen a lograr los objetivos de desarrollo sostenible desde el punto de vista de la productividad.

Es muy claro que a menos que nosotros incrementemos la provisión de la producción del aceite de palma desde ahora hasta el 2030, serán necesarias otras 100 millones de toneladas de aceite vegetal. El mundo tendrá que encontrar por lo menos 200 millones de hectáreas para tierras para la producción de soya o 100 millones de granjas para girasoles. De lo contrario esos 100 millones de toneladas de aceite de palma tendrán que ser producidos por una combinación de productividad de Indonesia y Malasia como accionistas minoritarios, incluyendo un programa de replantación y expansión de los países productores, utilizando sus respectivas tierras abandonadas y degradadas.

Así es que por cualquier definición esto ya pone al aceite de palma como el aceite vegetal más sostenible en todo el mundo, y cuando hablamos de sostenibilidad también se tiene que decir que es el futuro de la sostenibilidad. De todas las metas que estamos mirando, aquí entendemos ahora qué tan estratégica e importante es la producción de aceite de palma para todas las metas sostenibles a nivel mundial. La siguiente pregunta sería cómo podemos resetear el debate equivocado y las controversias que hay alrededor de este aceite.

Tenemos que asegurar de alguna manera que todos los objetivos estén alineados y balanceados con las metas sociales, de desarrollo y de sostenibilidad global. Es por eso que actualmente estamos trabajando de manera cercana con varias organizaciones de las Naciones Unidas, incluyendo alimentación, desarrollo y ambiente, en todo lo que tiene que ver con las tierras y la agricultura, para que reconozcan esta nueva realidad, y de hecho, las contribuciones del aceite de palma en muchos países para lograr metas de desarrollo sostenible.

Mensaje del Presidente de la República de Colombia, Iván Duque Márquez

Message by the President of the Republic of Colombia,
Iván Duque Márquez



IVÁN DUQUE MÁRQUEZ

Presidente de la República de Colombia
President of the Republic of Colombia
Fotografía: Presidencia de la República

Queridos amigos palmicultores:

El sector palmero es un ejemplo de vocación productiva y de compromiso con el campo colombiano. En 2002, Colombia apenas llegaba a las 120.000 hectáreas sembradas con palma de aceite, mientras que hoy existen más de 500.000. Esto es muestra del gran ímpetu de este sector y de su enorme potencial de crecimiento. Estoy convencido de que si implementamos las herramientas y los correctivos adecuados podremos llegar en los próximos años al millón de hectáreas.

Por otra parte, en este gobierno vamos a tomar todas las medidas necesarias para abrir nuevos mer-

cados para el aceite de palma colombiano, uno de los productos que mayor crecimiento y demanda tendrá en los próximos años. Tenemos que aprovechar los mercados ya existentes y abrirnos paso hacia nuevos escenarios internacionales. Actualmente, somos el cuarto productor mundial de aceite de palma. Tan solo en 2017, la producción de aceite de palma crudo superó 1,6 millones de toneladas, lo cual representó un incremento de 42 % frente a las cifras de 2016. Con el área actualmente sembrada pronto llegaremos a una producción de dos millones de toneladas de aceite. Imaginen lo que podemos hacer si logramos nuestro objetivo de aumentar las hectáreas de palma en todo el país.

Apoyar al sector palmero es apostarle a un sector productivo sostenible, generador de empleo y transformador del campo. Muestra de ello es que el cultivo de palma genera alrededor de 170.000 empleos, con un alto porcentaje de formalidad y con un ingreso promedio superior al de otros sectores agropecuarios. Además, este cultivo ha contribuido considerablemente al desarrollo de muchos municipios afectados por la violencia, convirtiéndose en una fuerza positiva para muchas regiones del país y siendo ejemplo de que la legalidad es el camino para transformar a Colombia. Cuando existe una vocación de trabajo y honradez, cuando se tiene el valor de decirle no más a la tentación de la economía ilícita, el campo colombiano encuentra salidas productivas que redundan en el bienestar de las comunidades y los territorios.

Los más de 6.000 palmicultores colombianos están muy bien articulados, y gracias a los casi 70 Núcleos Palmeros existentes tienen la oportunidad de mejorar su acceso a asistencia técnica ambiental y social, así como a iniciativas de responsabilidad social empresarial, educación primaria, vivienda y salud. Algunos pequeños y medianos productores incluso participan como accionistas en las plantas de transformación primaria del sector palmero, lo cual es un ejemplo del matrimonio feliz entre la agroindustria y la pequeña producción.

Hoy contamos con casi 140.000 modelos asociados, donde confluyen pequeños, medianos y grandes productores, los cuales han permitido además que los pequeños productores mejoren sus ingresos y su calidad de vida, que accedan con mayor facilidad al crédito y a los incentivos que incrementan su capacidad tanto de negociación como de comercialización, mejorando con ello su organización y sus capacidades empresariales.

Amigos, este es un sector que también se ha preocupado por el medio ambiente, por producir

conservando y conservar produciendo. La palma de aceite en Colombia se ha desarrollado prácticamente sin deforestar y sus esquemas de producción son capaces de generar una protección forestal continua. Esto es de vital importancia, porque no podemos seguir avanzando cuando las riquezas naturales de un país como Colombia son sometidas a un proceso devastador de agotamiento de los recursos. Por eso, es necesario que la responsabilidad impere y que Colombia se constituya en uno de los países más comprometidos con la protección de su biodiversidad, toda vez que somos uno de los países con mayor biodiversidad por kilómetro cuadrado.

En este escenario, tenemos que pensar no solamente en la producción sostenible, sino también en herramientas de producción que nos permitan generar más riqueza forestal. Estoy convencido de que los palmicultores seguirán siendo nuestros aliados en este objetivo, puesto que la palma de aceite tiene un gran potencial de crecimiento con un uso sostenible del suelo. Igual de importante es la contribución de este sector a la mitigación del cambio climático gracias a la producción de biodiésel, un insumo que ayuda a reducir las emisiones de gases efecto invernadero.

Estoy seguro de que vamos por el camino correcto. Con el apoyo del sector palmero estamos haciendo realidad la visión que tenemos para Colombia: la de un país donde la legalidad, el emprendimiento, la equidad y la transparencia definen nuestro destino. Tengan la seguridad de que en mí encontrarán un presidente dispuesto a trabajar con ustedes para seguir desarrollando las regiones y continuar generando las mejores condiciones para los cultivadores y sus familias.

Les deseo lo mejor en este encuentro y espero verlos personalmente muy pronto.

¡Muchas gracias!

La palma de aceite, opción para el desarrollo sostenible e inclusivo del campo colombiano*

The Oil Palm, Option for the Sustainable and Inclusive Development of the Colombian Countryside

* Texto extraído del discurso de instalación del Ministro de Agricultura y Desarrollo Rural, Andrés Valencia Pinzón



ANDRÉS VALENCIA PINZÓN
Ministro de Agricultura
y Desarrollo Rural
Minister of Agriculture and Rural
Development, Colombia

La palma es una opción para el desarrollo sostenible e inclusivo del campo colombiano. Es una actividad que evoluciona y crece con reconocida vocación exportadora. A nivel mundial, es un sector interesado en la innovación enfocado en la sostenibilidad, y las cifras hablan por sí solas: una producción de 1.600.000 toneladas cuyo valor asciende a 3.7 billones de pesos. Como bien lo reflejan los resultados, solamente en el 2017 la producción de palma creció 42 %, la productividad 31 % y las exportaciones lo hicieron en 40 %. Es difícil ver un sector de la economía colombiana que crezca a doble dígito de manera consecutiva.

La palmicultura representa 170.000 personas, empleadas formalmente. Es el sector del campo colombiano tal vez de los más formales con la floricultura y la avicultura. El 80 % de las familias vinculadas a este son pequeños y medianos productores, lo que lo hace un sector con enorme responsabilidad social que ha sido fundamental en el pilar de legalidad que ha venido promoviendo el Gobierno y el presidente Duque. Desde antes de posesionarnos, el sector palmicultor ha sido fundamental en la sustitución de cultivos ilícitos.

En un escenario donde los mismos productores son los socios, la palma hace una valiosa contribución al PIB

agropecuaria con el 6,3 %, y tiene una enorme influencia en muchos municipios del país en donde el rigor de la violencia, el conflicto interno y la pobreza han sido sus características. Gracias a la palma se han podido levantar importantes zonas teniendo en cuenta la labor social que se menciona. Además, será una gran colaboradora en la fase de estabilización y consolidación del territorio colombiano, dado que la agricultura es la mejor alternativa de aprovechamiento, sobre todo por el impacto de este cultivo desde el punto de vista económico.

En los últimos años esta actividad ha dado grandes pasos hacia la sostenibilidad social y ambiental. Desde el 2004 la palmiticultura colombiana adoptó los estándares de la Mesa Redonda sobre Aceite de Palma Sostenible, RSPO, y como resultado el país ha sido anfitrión de dos conferencias mundiales de la misma: en 2008 y en 2018. Igualmente en los últimos cuatro años, se han realizado importantes estudios hacia la certificación para dicho estándar, y para nadie es desconocido que los procesos pueden ser desafiantes y toman tiempo. Los créditos en términos sociales y ambientales y en viabilidad económica, exceden con creces las exigencias del estándar. En 2018, el 13 % del volumen de aceite de palma producido en el país cuenta con dicha certificación, un balance que no puede ser ensombrecido por la reducción del 8 % que se da en la producción debido a la baja de los precios internacionales este mismo año.

El repunte de las enfermedades y algunas condiciones climáticas desfavorables en la palmiticultura no se harán esperar, e invitan a proponer estrategias para enfrentar la situación con seguridad. Los eventos son el espacio para comprender y plantear las soluciones a los desafíos coyunturales y estructurales que enfrenta la productividad. Desde el Ministerio de Agricultura se seguirá con enorme interés las deliberaciones que surjan y las propuestas que se deban adoptar por parte de los productores de palma, con miras a cambiar o replantear estrategias en materia de enfermedades fitosanitarias, con el apoyo de Instituto Colombiano Agropecuario, ICA.

Se debe también apoyar al sector con políticas para el mejoramiento de la productividad y la rentabilidad de la actividad agropecuaria. Con ello, contribuiremos a la legalidad, el emprendimiento y la equidad, ejes centrales del gobierno liderado por el Presidente Duque.

Hay tres temas que son vitales para la conciliación de una palmiticultura colombiana competitiva y sostenible.

El primero de ellos tiene que ver con la construcción de una imagen diferenciada y beneficiada para el aceite de palma producido en Colombia. En segundo lugar, la innovación como motor de crecimiento del sector, y por último, la importancia de utilizar herramientas para la administración de los riesgos climáticos y de mercado que afectan la actividad. Con una imagen diferenciada del aceite de palma, la palma colombiana es generadora de progreso. Sin embargo todavía hoy continúa siendo criticada en escenarios internacionales. Bien lo plantea Fedepalma: la palmiticultura colombiana es única y diferenciada, y con ello el gremio busca sensibilizar a la sociedad sobre los aportes de la palma a nivel social, medioambiental y económico.

Este propósito solo se concretará en la medida en la que exportemos aceite de palma incluidos sus derivados, debidamente certificados. Para ello resulta fundamental exponerlos en esfuerzos privados y públicos. Una señal inequívoca hacia dicho objetivo es la radicación, en 2017, del Acuerdo de Voluntades para la Deforestación Cero en la Cadena de Aceite de Palma en Colombia. Se trata de un compromiso derivado de la declaración conjunta sobre reducción de la deforestación propia promulgada por Colombia, Noruega, Alemania y el Reino Unido, para demostrar que la palmiticultura colombiana no es deforestadora y que se desarrolla con fundamento en la zonificación por aptitud del suelo desarrollada por el Ministerio de Agricultura. Estos son dos mensajes dignos de ser conocidos por la sociedad. El cultivo tiene un potencial de desarrollo sin deforestar de más de 23 millones de hectáreas y el gremio cuenta con sistemas de información para la planificación de la siembra realizados conjuntamente con la Unidad de Planificación Rural Agropecuaria, UPR. Por otro lado, mediante la ejecución del proyecto Paisaje Palmero Biodiverso se generan herramientas para conjugar la sostenibilidad ambiental con la productividad del cultivo, y es por ello que se debe insistir en la labor diplomática.

Como parte del programa sobre diplomacia sanitaria y comercial, para evitar medidas discriminatorias amparadas en metodologías no probadas que buscan excusar la protección de los bosques para beneficiar solamente la producción local de aceites vegetales de la Unión Europea, el Gobierno está muy pendiente de las discusiones y deliberaciones que se

están dando allí, y se actúa de la mano de Fedepalma, de la Cancillería y del Ministerio de Comercio, Industria y Turismo con el fin de evitar que una medida desfavorable prospere en el corto plazo. Por eso la importancia de ingresar al Consejo de Países Productores de Aceite de Palma, CPOPC, donde se está trabajando en la parte final del protocolo de adhesión de Colombia, y así seguir defendiendo la palma en los mercados internacionales, particularmente el de la Unión Europea.

También es conveniente mencionar que el modelo de valor agregado y el uso eficiente de los recursos, y por ende la diferenciación del aceite de palma, son fundamentales no solamente en el mercado internacional sino también en el nacional. El cultivo de palma será un aliado estratégico para la política de agricultura. Se han visto casos exitosos en Tibú y otros muy similares en las diferentes zonas palmeras de Colombia. El Gobierno se apalancará en las fortalezas del sector para la promoción de modelos agrícolas inclusivos basados en el establecimiento de alianzas productivas.

Hablando de apalancamiento e innovación, el dinamismo de la palmicultura debe apalancarse en innovación para el desarrollo de alternativas para el aceite de palma. Si bien es cierto que en el 2017 casi el 50 % de la producción se destinó a mercados internacionales, también lo es que el 85 % de ese volumen corresponde al aceite crudo. Es conveniente mencionar que hoy en día Colombia se ha vuelto, además, un importador importante de aceite de palma crudo y de otros aceites: el 50 % del mercado de aceite crudo o de aceites vegetales está compuesto por las importaciones. Colombia se ha convertido en un destino de importaciones de diferentes productos agropecuarios procedentes de muchos de los acuerdos que el país firmó en el pasado en materia de libre comercio y no puede seguir siendo tierra fértil para que ingresen importaciones de productos agropecuarios de baja calidad o que no cumplen con las normas de inocuidad. Desde el Ministerio de Agricultura no solamente buscaremos aprovechar los TLC para que podamos acceder a más mercados

internacionales. También se tienen que aprovechar las normas de defensa comercial que existen, para evitar que esto se vuelva tierra de nadie para las importaciones. Si queremos aumentar la rentabilidad resulta por supuesto imperativo invertir en la ecua-ción, tratar de exportar mucha más producción con valor agregado. Colombia en su condición de cuarto exportador de aceite de palma debe distinguirse de los demás mercados internacionales por ser generador de valor agregado y desde el Ministerio estamos comprometidos con el estímulo de las actividades agropecuarias de mayor valor. Por ello apoyaremos con instrumentos de política pública actividades tales como la investigación, la promoción, la asociatividad y el crédito.

La FAO y la OCDE en sus perspectivas 2017-2026 para la actividad palmera, sugieren un crecimiento de la producción de aceites vegetales comestibles como una respuesta al aumento de la demanda del alimento. Así mismo llama a la desaceleración de su uso para la producción de biocombustibles. Sin embargo, nosotros estamos convencidos de que en Colombia todavía existe un campo en esa materia, y con el estímulo de la producción de etanol y biodiésel, sobre todo por motivaciones de orden ambiental, podemos lograr seguramente un mejor aprovechamiento energético de esos dos productos. Sabemos que la demanda por biocombustibles presenta hoy enormes desafíos no solamente por la sensibilidad que tenemos en la política pública interna, sino porque se tendría a su vez que pensar en factores más efectivos como el crecimiento económico y poblacional, y la preservación del medioambiente a través del mejoramiento de la calidad del aire particularmente en las ciudades. Por eso es necesario trabajar conjuntamente con las entidades de la Comisión Intersectorial de Biocom-

El modelo de valor agregado y el uso eficiente de los recursos, y por ende la diferenciación del aceite de palma, son fundamentales no solamente en el mercado internacional sino también en el nacional.

bustibles, analizando la oportunidad de incrementar la mezcla de combustibles y, por supuesto, estudiando todas las variables que hoy en día influyen en una decisión, como por ejemplo los costos de las materias primas, los márgenes de los investigadores y los precios del consumidor. Desde el Ministerio trabajaremos con el de Minas y Energía para hacer obligatoria la mezcla de los biocombustibles, particularmente el biodiésel, en la gran minería.

La innovación también será protagonista en el fomento de la extensión agropecuaria y la búsqueda de soluciones para la Pudrición del cogollo y la Marchitez letal. Son bien conocidas las investigaciones que ha venido adelantando Cenipalma, particularmente en lo que respecta a estas dos enfermedades. Es por ello que se ha expedido una resolución para que dicho centro sea importador y comercializador de insumos para la industria, lo que automáticamente abre la puerta para que el uso de la hormona ANA pueda ser ampliamente difundido en los cultivos de palma a nivel nacional.

La actividad exportadora del cultivo requiere por supuesto el uso de instrumentos para la administración del riesgo. Si bien es cierto que se cuenta con el Fondo de Estabilización de Precios, desde el Ministerio de Agricultura promoveremos la cultura del aseguramiento ante la volatilidad de los precios y las variaciones de las tasas de cambio. Recientemente se expidió una resolución en la que se subsidian unos instrumentos de cobertura de precio y de tasa de cambio para los productores de maíz amarillo y blanco. Este instrumento permite subsidiar con más o menos 35 mil toneladas de la producción de maíz que está en este momento saliendo particularmente de la Costa Atlántica y del departamento de Córdoba.

Por otra parte, se ha logrado que las compañías aseguradoras incluyan afectaciones de la producción agropecuaria por Pudrición del cogollo, Marchitez letal y Anillo rojo. Por eso se invita a que se haga uso de los recursos y del incentivo para el seguro, que cubre hasta el 80 % el valor de las primas. Para este año se asignaron 30 mil millones de pesos y el sector palmi-

cultor no estaba siendo beneficiado dado que el seguro no cubría enfermedades de carácter fitosanitario, solo afectaciones climáticas. Lo que se quiere lograr es una ampliación de coberturas de tal manera que los cultivadores de palma tengan asegurada su cosecha, por lo menos su producción, ante enfermedades de tipo fitosanitario.

Aparejar las actividades productivas con la legalidad de emprendimiento es una de las banderas del Presidente Iván Duque. Propender por la formalidad empresarial y laboral y la lucha frontal contra el contrabando, es necesario para el progreso de las zonas rurales del país. Igualmente es importante el aprovechamiento de los tratados comerciales internacionales y la puesta en marcha de una estrategia de diplomacia sanitaria. La agenda del Ministerio en estos aspectos se centrará en la búsqueda de resultados de corto plazo, así como la promulgación de marcos normativos claros que propendan por la estabilidad de las inversiones y estimulen el desarrollo. En este orden de ideas el sector palmero colombiano se beneficiará del acceso efectivo a los mercados internacionales y la recuperación de segmentos del mercado nacional hoy servidos con productos importados.

Se avanzará en el reconocimiento internacional de la palmicultura colombiana como actividad sostenible por la vía de la certificación, y con ello convertiremos las restricciones del Parlamento Europeo para la importación del aceite de palma, en oportunidades para una sociedad generadora de tejido social, estabilidad económica y ambiental.

Para terminar, el Ministerio de Agricultura, sus entidades adscritas y vinculadas, trabajarán con enorme devoción para el servicio de los palmicultores y para los agricultores de Colombia. Se acabaron esos días en los que el Ministerio laboraba solamente en función de los intereses políticos del gobierno de turno. El Ministerio de Agricultura está aquí para trabajar de la mano con ustedes, para tener un campo colombiano mucho más rentable, mucho más productivo y, por supuesto, que transforme las sociedades rurales.

Fedepalma entrega reconocimiento a José Ignacio Sanz Scovino

Fedepalma Gives to José Ignacio Sanz Scovino a Special Recognition

En el marco de la XIX Conferencia Internacional sobre Palma de Aceite, el doctor José Ignacio Sanz Scovino, Director de Cenipalma 2007-2017, recibió la condecoración “Orden del Mérito Palmero” en la Categoría Extraordinaria, Grado Plata.

La Orden al Mérito Palmero se instituyó en 1997 como distinción gremial para estimular y reconocer los méritos de personas, entidades o instituciones que a través de su labor contribuyen al bienestar de la comunidad palmicultora, el desarrollo del sector palmero y el progreso del país.

El doctor Sanz Scovino, quien cuenta con un Ph. D. en Ciencias del Suelo de la Universidad de Reading (Inglaterra), se vinculó a Cenipalma en 2007 como su Director Ejecutivo, tras haber construido una importante carrera académica y logros profesionales asociados a su desempeño como científico investigador en el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) y el International Development Research Centre (IDRC), entre otros. En 2017, el doctor Sanz se retiró de Cenipalma para disfrutar de una merecida jubilación tras años de arduo trabajo.

La labor adelantada por el doctor José Ignacio Sanz Scovino, con el decidido acompañamiento gremial y el apoyo de la Junta Directiva de Cenipalma y su equipo de colaboradores, se tradujo en importantes soluciones tecnológicas en el ámbito del cultivo de la palma de aceite y el beneficio de su fruto, las cuales llevaron a la consolidación y el posicionamiento de Cenipalma como una institución de gran reconocimiento dentro y fuera del país.

Entre los principales resultados de la gestión del doctor Sanz se destacan los siguientes hitos:

- En lo organizacional, el crecimiento de Cenipalma en número de investigadores y en su nivel educativo (incremento de 4 a 10 investigadores con formación de doctorado y de 12 a 25 profesionales con título de maestría), así como el fortalecimiento de los campos experimentales (pasando de 1 a 4) y de los convenios y redes de cooperación nacionales e internacionales.
- En lo científico, sobresalen resultados como la colección biológica de *Elaeis guineensis* y *Elaeis oleifera* disponible en el Campo Experimental



De izquierda a derecha, Jens Mesa Dishington, Presidente Ejecutivo de Fedepalma; José Ignacio Sanz Scovino, Exdirector Ejecutivo de Cenipalma; y Luis Francisco Dangond Lacouture, Presidente de la Junta Directiva de Fedepalma, durante la entrega de la distinción.

Palmar de la Vizcaína; la selección de palmas de diferentes orígenes por contar con características de interés para el programa de mejoramiento; la estandarización de la metodología de multiplicación clonal; el desarrollo de técnicas que permiten reducir el costo y el tiempo de mejoramiento; la colección de artrópodos, insectos benéficos y microorganismos entomopatógenos; el desarrollo de herramientas para el monitoreo y control biológico de insectos plaga; la identificación de *Phytophthora palmivora* como agente causal de la Pudrición del cogollo; y el desarrollo de herramientas como Geopalma® Plantación (marca registrada) y CeniSiiC® (marca registrada), entre otras.

- En el ámbito de la extensión rural, vale la pena mencionar la vinculación del área de Extensión a Cenipalma, lo cual permitió unificar el proceso de investigación y entrega de resultados y fortalecer el sistema de transferencia de tecnología “Productor a productor” y de asistencia técnica a través de las Unidades de Asistencia y Auditoría Técnica, Ambiental y Social (UAATAS). Así mismo, cabe anotar la vinculación del Programa Sectorial de

Manejo Fitosanitario al quehacer de la Dirección de Extensión de Cenipalma.

- En cuanto a indicadores de ciencia, tecnología e innovación, se cuenta la publicación de 276 artículos científicos, 68 libros de investigación y divulgación, 40 boletines divulgativos, 34 proyectos de investigación, 2 signos distintivos, 794 eventos de transferencia de tecnología con más de 22.000 beneficiarios, la vinculación de 321 estudiantes, la participación de 39 jóvenes investigadores y un total de 3 premios recibidos por Cenipalma.

El legado del doctor José Ignacio Sanz Scovino a la tarea de la Federación es motivo de profunda gratitud y unánime reconocimiento por parte de la comunidad palmera del país, así como una fuente de permanente motivación y orgullo para quienes continúan su labor.

Cenipalma, recordando las dos frases del doctor Sanz Scovino: “Contra buen trabajo no hay nada que decir” y “Si no es divertido no vale la pena”, mantendrá su enfoque de alto nivel científico, y a la vez aplicado, con fortaleza y dedicación para seguir entregando resultados útiles a los palmicultores colombianos.

Bioeconomía y palma de aceite*

Bioeconomy and Oil Palm

CITACIÓN: Day, L. (2019). Bioeconomía y palma de aceite. *Palmas*, 40 (Especial, tomo I), 29-31.

PALABRAS CLAVE: bioeconomía, propuesta, desarrollo, conservación, elementos biológicos, bienes, servicios, sostenibilidad.

KEYWORDS: Bioeconomy, proposal, developing, conservation, biological elements, goods, services, sustainability.

*Artículo elaborado a partir de la transcripción de la presentación de Lloyd Day durante la XIX Conferencia Internacional sobre Palma de Aceite.



LLOYD DAY

Subdirector General, Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA)
Deputy Director Inter-American Institute for Cooperation on Agriculture -IICA

El Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), es una organización de redes de especialistas que construyen alianzas estratégicas para desencadenar el trabajo colaborativo entre el sector privado y la sociedad civil. Su objetivo es estimular, promover y apoyar los esfuerzos de los estados miembros, para lograr su desarrollo agrícola y el bienestar rural por medio de la cooperación técnica internacional. Actualmente, la gestión realizada por el IICA para potenciar la contribución de la agricultura en América Latina, está basada en la construcción

y el diseño de estrategias; apoyo técnico para la movilización de recursos y conocimiento; gestión y administración de recursos para proyectos y acciones de corto plazo ante eventos coyunturales o emergencias –como los terremotos de Haití y Ecuador, y los huracanes que han afectado la región Caribe, entre otros–, y el fortalecimiento de los lazos de cooperación entre las naciones del continente americano.

Es bien sabido que en estos tiempos, la agricultura mundial enfrenta grandes presiones para satisfacer

la demanda alimentaria de una población mundial no solo sustancialmente más grande, sino también más adinerada, más urbana y cada vez más exigente. Se calcula que en los próximos años alcanzaremos una población de más de nueve mil millones de habitantes, de los cuales 77 % habitará zonas urbanas y más del 50 % pertenecerá a la clase media. Por ende, el incremento requerido en la producción agrícola y pecuaria mundial para 2050, que se estima fluctuaría entre 60 y 111 %, debe desarrollarse en un escenario de mercado que busque la reducción del área cultivada por habitante, puesto que en las próximas tres décadas seremos testigos de una fuerte competencia por los recursos hídricos, así como de conflictos entre el desarrollo de las actividades productivas y la conservación de la biodiversidad global y los recursos naturales.

Es, en este contexto, donde la bioeconomía surge como una propuesta de desarrollo para conciliar las necesidades de una población en crecimiento y la conservación de nuestro planeta y sus recursos.

Definiciones sobre bioeconomía existen muchas, pero, en términos generales y muy simples, se trata de la utilización intensiva y eficiente de los elementos biológicos disponibles para producir de manera sostenible los bienes y servicios que la sociedad demanda. Por recursos biológicos entendemos todo el material y la energía que nos pueden proveer los seres vivos, tanto animales como vegetales. Pero no se trata solamente de recursos biológicos. La bioeconomía va más allá y permite aprovechar también los conocimientos y los procesos biológicos; por ejemplo, la fotosíntesis, los procesos bioquímicos y biofísicos que utilizan los seres vivos para su alimentación y reproducción, los bacterianos, los microvirales, entre muchos otros.

Los recursos biológicos son todo un conjunto de formas de vida y la información genética que estas portan consigo mismas, lo que incluye virus, bacterias y microorganismos en general, y todas las formas de biomasa, incluyendo la de residuos derivados de los procesos de producción y consumo. En esos procesos biológicos la bioeconomía utiliza, por ejemplo, los conocimientos sobre cómo los seres vivos reducen los desperdicios, transforman los desechos en productos útiles o desarrollan nuevos materiales, usan carbón como materia prima, la fotosíntesis artificial, la degradación paulatina, entre otros.

El aprovechamiento de estos elementos biológicos dependerá de las capacidades y la voluntad de cada nación. Es pertinente mencionar que no existe una receta única en términos generales, pues el modelo de bioeconomía de cada país está supeditado a los recursos biológicos con que cuente, su vocación productiva y su interés por desarrollar esquemas productivos sostenibles y altamente eficientes. Se trata de ser más productivos y aprovechar en mayor medida todo lo que hoy desperdiciamos, encontrando nuevos usos para la biodiversidad. En algunos casos será a través del incremento de eficiencia de las cadenas productivas, la reducción de pérdidas, el desarrollo de nuevas aplicaciones y usos de productos de base biotecnológica, el empleo de tecnología de punta, la creación de productos de base biológica, la generación de bioenergía, el aprovechamiento de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos, entre un gran abanico de posibilidades, que no aplican en todos los casos, pero que si pueden llegar a potenciarse a través del establecimiento de redes de cooperación y ecosistemas bioeconómicos entre sectores productivos, cadenas de valor y países.

El desarrollo del modelo bioeconómico debe ser un tema de especial interés para las naciones de América Latina, pues es por todos bien conocido que esta región alberga la mayor riqueza biológica del planeta, la cual, además de ser aprovechada, debe ser fuertemente protegida y conservada. En este sentido, la bioeconomía busca identificar cómo hacer uso de nuestra riqueza biológica no solo para producir más alimentos, más fibra y más energía, sino también que, a partir de la gestión de conocimiento, los recursos naturales adquieran un papel protagónico en el desarrollo y consolidación de toda actividad productiva. América Latina tiene un potencial inimaginado en términos de bioeconomía dada la riqueza biológica y natural de la región. No debemos olvidar que esta parte del continente alberga a ocho de los 17 países más megadiversos del planeta: Bolivia, Brasil, Colombia, Ecuador, Perú, Venezuela, Costa Rica y México, que abarcan más de una cuarta parte de las tierras cultivables y una tercera parte de los recursos de agua dulce del mundo.

Estas condiciones han hecho que América Latina sea una de las principales regiones productoras de biomasa sostenible, con las que se pueden produ-

cir desde medicamentos elaborados a partir de compuestos naturales hasta energías limpias, para satisfacer la enorme demanda de recursos energéticos de la población y las industrias.

Dentro de los recursos energéticos que posee Latinoamérica y el Caribe, la biomasa es uno de los más abundantes y diversos, y a su vez, representa un significativo potencial para el aprovechamiento de los residuos de algunas industrias, como la del cultivo de palma de aceite y la producción de aceite de palma. El término biomasa incluye toda materia orgánica de origen vegetal o animal u otros organismos, incluso los materiales procedentes de su transformación natural o artificial, que permiten ser procesados para proveer formas bioenergéticas más elaboradas para el consumo final. La bioenergía puede ser definida como cualquier forma de energía acumulada mediante procesos fotosintéticos recientes o bienes obtenidos mediante la degradación biológica de los microorganismos, como en el caso del biogás producido a partir de la descomposición anaeróbica de desechos orgánicos y otros residuos agropecuarios y agroindustriales; los biocombustibles líquidos de primera generación obtenidos de los productos de cultivos agroindustriales como la caña de azúcar y la palma de aceite, o la bioelectricidad generada por la quema de combustibles sólidos como el bagazo o la leña.

Frente a esto último, resulta pertinente mencionar que la investigación y el desarrollo de biocombustibles avanzados (comúnmente denominados como de segunda generación), ofrece grandes oportunidades para la gestión de un grupo diverso de recursos de biomasa renovable, con la particular característica de que, a su vez, contribuyen con la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, la mitigación del cambio climático y la protección de fuentes hídricas. Por lo an-

terior, se requiere de mayor investigación, desarrollo y validación de tecnologías para el uso de la biomasa, identificando nuevos senderos para el aprovechamiento de la bioenergía y contribuyendo al uso sostenible de los recursos energéticos de base biológica, lo que requiere, además, de interacciones complejas con otros sistemas sociales y ambientales.

Con base en lo que se ha mencionado, sobresalen los esfuerzos del sector palmero colombiano con respecto a la investigación en torno a los usos y el aprovechamiento de los subproductos y los residuos de esta agroindustria, que han venido siendo utilizados para la generación de energía y su uso en las plantas de beneficio del fruto de la palma de aceite: la producción de biofertilizantes para el cultivo; alimentos para animales; carbón activado y biocombustible, entre otras aplicaciones menores. Estos desarrollos han permitido que esta agroindustria no solo diversifique su oferta de valor, disminuya costos y genere procesos de innovación productiva, sino que también contribuya a la reducción de residuos en las diferentes etapas de su proceso productivo, la disminución de gases de efecto invernadero en la fase de extracción del aceite de palma, el uso eficiente del recurso hídrico, la conservación de los suelos a partir del empleo de biofertilizantes y la protección de hábitats en zonas circundantes al área de cultivo.

Es importante no escatimar esfuerzos en este frente de acción, pues, como hemos visto de manera muy breve, la bioeconomía ofrece múltiples oportunidades para que sectores como el de la palma de aceite generen cada vez mayor valor por medio del aprovechamiento de los recursos físicos, tecnológicos y de conocimiento, combinados con los recursos biológicos de su entorno, en un marco de eficiencia en el uso de recursos y de respeto por el medioambiente.

Reseña histórica, estado actual y perspectivas futuras de la agroindustria global de la palma de aceite

Historical Review, Current Status and Future Prospects of Global Oil Palm Agroindustry



AHMAD KUSHAIRI DIN

Director General Malaysian Palm Oil Board (MPOB)
CEO, MPOB

CITACIÓN: Kushairi A. (2019). Reseña histórica, estado actual y perspectivas futuras de la agroindustria global de la palma de aceite. *Palmas*, 40 (Especial, Tomo I), 32-33.

PALABRAS CLAVE: perspectivas, agroindustria, palma de aceite.

KEYWORDS: perspectives, agroindustry, palm oil.

La palma de aceite comercial, *Elaeis guineensis*, es nativa del África Occidental tropical. Su especie asociada, la *E. oleifera*, es nativa de América Latina. La palma de aceite produce dos tipos de aceite: el de palma y el de palmiste. La producción inicial provenía de cultivos de palma natural de uso residencial y posiblemente se comercializaba con anterioridad a los registros históricos. La palma de aceite africana llegó a Latinoamérica y Asia desde el siglo XVII a través de comerciantes europeos. El aceite de palma rojo, rico en nutrientes, era esencial para los marineros que emprendían largos viajes por mar. La fuerza que

domesticó y revolucionó la industria de la palma de aceite provino en parte del aumento repentino de la demanda que surgió como resultado de la Revolución Industrial Británica a comienzos del Siglo XX.

Los europeos comenzaron a invertir en la producción de aceite de palma en África Occidental y posteriormente en el Sudeste Asiático. Inmediatamente se creó la infraestructura necesaria para la Investigación y el Desarrollo (I&D), la cual, aunada a la colaboración internacional, aceleró el crecimiento de la industria. A pesar de su origen africano, la palma de

aceite se sembró por primera vez a nivel comercial en Indonesia (1911), Malasia (1917), Guatemala (1940) y Colombia (1945). La expansión del área sembrada recibió el apoyo de las políticas gubernamentales y la armonía política, gracias a los suelos y a la idoneidad agroclimática, a la capacidad financiera y al respaldo obtenido en temas de I&D.

Actualmente, el aceite de palma domina el mercado mundial de las grasas y los aceites gracias a su versatilidad para usos alimentarios y no alimentarios, sus atributos nutricionales, su competitividad económica y su abundante oferta durante todo el año. Inicialmente, los principales productores y exportadores de aceite de palma eran los países africanos, especialmente Nigeria; posteriormente, Malasia e Indonesia ocuparon este lugar. Si bien algunos países productores se convierten en futuros países industrializados, el Sudeste Asiático sigue siendo el principal motor del aceite de palma, con un posible giro hacia América Latina. Los mercados del aceite de palma podrían desviarse hacia países con altos índices de población, alejados de los grandes productores de aceites comestibles de la competencia.

La productividad se fortalece junto con la cadena de la oferta, mientras los productos de consumo mejoran y se diversifican. Aunque los híbridos intraespecíficos e interespecíficos son comunes, los híbridos intergenéricos y la modificación genética pueden imponerse, apuntando a rasgos de gran importancia desde el ámbito agronómico, al nicho de

los ácidos grasos de alto valor agregado y a la mitigación de plagas y enfermedades exóticas y mutadas. Se espera que la mecanización de las plantaciones, en especial del sistema de cosecha, logre grandes avances en el futuro cercano.

El camino a seguir es la revolución agroindustrial a través de la adopción de tecnologías transformadoras, dentro de las cuales se cuentan la genómica, las técnicas digitales basadas en la tecnología de la información, los sensores avanzados, la robótica y la automatización. La agricultura inteligente constituye una necesidad y se debe asemejar más al proceso de manufactura.

Así mismo, el esquema de certificación de la sustentabilidad es parte integral del sistema de producción. Se espera que persista la percepción de los problemas actuales, especialmente impulsados por factores económicos que se escudan tras el medio ambiente, la salud y la nutrición. A pesar de las medidas correctivas y las refutaciones científicas, todavía existe la constante necesidad de lanzar ofensivas correctivas. La gestión del éxito de la industria de la palma de aceite orientada por el mercado es costosa y multifacética, e incluye certificación, especificaciones y normas, leyes y reglamentos, tecnologías verdes, atributos nutricionales y de calidad, factibilidad económica, marcas y equidad social. Es así como, a través de estas líneas de desarrollo futuro, el aceite de palma se quedará para alimentar a la creciente población mundial.

Atributos nutricionales y de salud del aceite de palma: una actualización*

Nutritional and Health Attributes of Palm Oil: An Update



PRAMOD KHOSLA

Profesor Asociado Universidad Estatal
de Wayne
Associate Professor, Wayne State
University

CITACIÓN: Khosla, P. (2019). Atributos nutricionales y de salud del aceite de palma: una actualización. *Palmas*, 40 (Especial Tomo I), 34-39.

PALABRAS CLAVE: aceite de palma, nutrición humana, atributos nutricionales, consumo de aceites y grasas.

KEYWORDS: Palm oil, human nutrition, nutritional attributes, oils and fats consumption.

*Artículo original recibido en inglés y traducido por Carlos Arenas París.

Resumen

Se espera que el aceite de palma, principal aceite comestible del mundo, represente casi la mitad del consumo mundial en el año 2050. Además de ser una fuente de calorías y por su composición equilibrada de ácidos grasos saturados e insaturados, el aceite de palma se utiliza para diversas aplicaciones en las fórmulas alimentarias. El motor de la investigación sobre las grasas comestibles ha sido principalmente su capacidad para afectar el riesgo de enfermedades cardiovasculares (ECV) y se recomienda el consumo de una mezcla óptima de ácidos grasos comestibles. Sin embargo, las inquietudes sobre la salud de las poblaciones que consumen cantidades óptimas de grasa versus aquellas cuyo consumo es subóptimo son distintas. Datos recientes sugieren que el componente de carbohidratos de la alimentación es igualmente importante en lo que se refiere a su impacto sobre el riesgo de las

ECV. Numerosos estudios humanos han demostrado que el aceite de palma rojo, rico en carotenoides (pro-Vitamina A) y tocotrienoles (TT- familiares de la vitamina E), combate las deficiencias de vitamina A, tiene potencial anticancerígeno y la capacidad de proteger contra la neurodegeneración. Un estudio humano reveló que la FRT (Fracción Rica en Tocotrienol) atenuaba el desarrollo de lesiones de la materia blanca del cerebro. Además, recientemente, las aguas residuales del fruto de la palma han sido aprovechadas para obtener una fuente concentrada de compuestos fenólicos, los cuales han demostrado tener una amplia gama de beneficios en varios modelos animales e *in vitro*. Hace poco se informó sobre la Fase I de un estudio humano, con lo cual se espera seguir avanzando en la investigación en torno a los usos de este aceite y sus subproductos y sus beneficios para la salud humana.

Abstract

Palm oil, the leading edible oil on the world market, is expected to account for almost half of global consumption by 2050. In addition to being a source of calories, a fatty acid composition, balanced between saturated and unsaturated, results in palm oil finding use in numerous food formulations. Research in dietary fats has been driven by their ability to impact cardiovascular disease (CVD) risk, and an optimal mix of dietary fatty acids is recommended. However, the health concerns of populations consuming optimal versus sub-optimal quantities of fat are distinct. Recent data suggest that the carbohydrate component of the diet is equally important in affecting CVD risk. Red palm oil, rich in carotenoids (pro-Vitamin A) and tocotrienols (TT members of the vitamin E family, has been shown to combat Vitamin A-deficiency in numerous human studies. *In vitro* studies have revealed anticarcinogenic potential of TT. Several *in vitro* and animal studies have provided insights into TT ability to protect against neurodegeneration. A human study revealed that TRF attenuated brain white matter lesion development. Recently the aqueous waste stream from the palm fruit has been tapped to provide a concentrated source of phenolics. These oil palm phenolics have also shown a wide-array of benefits in multiple animal and *in vitro* models. A Phase I human study was recently reported.

Introducción

La producción mundial de aceites y grasas comestibles pasó de 84 millones de toneladas (mT) en 1991 a 214 mT en 2016. Con base en el crecimiento poblacional, en 2030 la producción deberá ser > 300 mT y en 2045 > 500 mT. Hacia 2050, el aceite de palma, que representaba ~ 14 % del consumo global de aceite en 1990, suministrará casi el 50 % del total de aceites y grasas comestibles. Esta cifra refleja la creciente participación del mercado del aceite de palma con base en la producción, exportaciones, uso de la tierra, así como en el rendimiento de aceite por hectárea. Si bien Indonesia y Malasia ocupan los primeros puestos, Colombia se ha convertido en el cuarto productor a nivel mundial.

Las grasas en la dieta (lípidos) son necesarias por varias razones, entre ellas: es fuente de ácidos grasos esenciales, transporta vitaminas liposolubles y reserva energética. Cada célula tiene grasa y el cerebro humano es uno de los órganos más ricos en términos de contenido de lípidos. Con base en información de la Organización Mundial de la Salud (OMS), un consumo de grasa de ~ 50-55 g/día per cápita es considerado como deseable para la salud humana. Muchas regiones del mundo con grandes centros de población consumen mucho menos que esta cantidad óptima, en contraste con países desarrollados, donde la cifra es sustancialmente mayor. Incluso en un país/región determinado puede haber vastas diferencias (Figura 1). Como consecuencia, las preocupaciones en países con un bajo consumo

de grasas son sustancialmente diferentes a las de los que tienen un consumo alto (Tabla 1). En el caso de estos últimos, la función de las grasas en la enfermedad cardiovascular ha sido un motor principal de la percepción pública y la política en salud.

Ácidos grasos en la dieta y enfermedad cardiovascular: una larga historia

Un estudio realizado en varios países mostró una relación entre las calorías consumidas de grasa y el riesgo de padecer enfermedad arterial coronaria (EAC), por lo que los mensajes de salud pública se han enfocado en reducir los ácidos grasos saturados (AGS) en la dieta y reemplazarlos con ácidos grasos monoinsaturados (MUFA, por su sigla en inglés) o poliinsaturados (PUFA, por su sigla en inglés). Sin embargo, ninguna grasa está compuesta únicamente por un tipo de ácido graso. Todas son mezclas, como el aceite de palma, que es mitad saturado y mitad insaturado. Si bien los PUFA son importantes como una fuente de ácidos grasos esenciales, están lejos de

ser ideales en formulaciones alimenticias debido a su inestabilidad. Centrarse en la capacidad de un tipo de ácido graso para impactar el colesterol en plasma, aunque es simplista y útil, no proporciona la historia completa. Dado que el riesgo de EAC se ve afectado de forma distinta por las diferentes subclases de lipoproteínas (LDL alta aumenta el riesgo, mientras que HDL alta es protector), los efectos de las subclases de ácidos grasos sobre LDL y HDL deben ser evaluados.

El estudio clásico de Mensink *et al.* (2003) documentó los efectos del reemplazo isoenergético del 1 % de las calorías de los carbohidratos de la dieta con el ácido graso de interés en LDL-C, HDL-C, y la proporción de colesterol total (TC/HDL-C). Tanto los AGS como los ácidos grasos trans (AGT) aumentaron el LDL-C, mientras que los MUFA y los PUFA lo redujeron. Todos los tipos de ácidos grasos trans (excepto por AGT) elevaron el HDL-C. En consecuencia, los AGT aumentaron la proporción de TC/HDL-C, reducidos por MUFA y PUFA, mientras que no hubo efectos con AGS. En lo que respecta a HDL-C, todos los subtipos de ácidos grasos lo redujeron (en relación con los AGT). Si el objetivo es atacar

Figura 1. Consumo de grasas en el mundo (g/día).

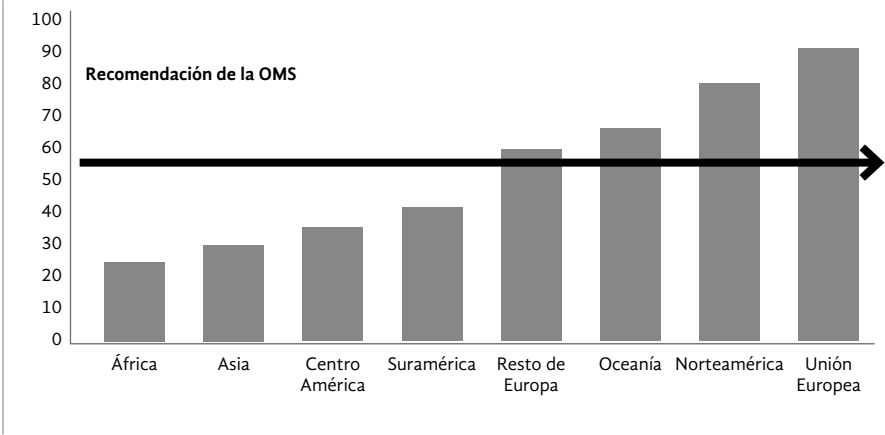


Tabla 1. Consumo promedio de grasas y azúcar en algunos países.

| País | Grasa | Azúcar |
|----------------|-------|--------|
| Estados Unidos | 66 g | 126 g |
| Bélgica | 95 g | 95 g |
| Colombia | 36 g | 38 g |
| India | 10 g | 5 g |
| China | 28 g | 16 g |

y reducir el LDL-C, los MUFA y PUFA son deseables. Sin embargo, dado que el HDL-C resulta beneficioso sobre el riesgo de ECV, el enfoque no debería ser solo el LDL-C. De los efectos sobre la proporción de TC/HDL-C, es claro que los AGT y AGS no son lo mismo, ya que este último no la afecta. Esto también se ha mostrado en un metaanálisis en el que se compararon los efectos de las dos clases de ácidos grasos en la proporción de LDL-C/HDL-C. Los AGT tenían el doble de probabilidades de aumentarla, en comparación con una cantidad equivalente de AGS.

Efectos de los ácidos grasos en la dieta sobre la enfermedad cardiovascular

El hecho de que los ácidos grasos afecten el perfil lipídico, simplemente sugiere un potencial para impactar la ECV. ¿En realidad hacen eso? En varios estudios epidemiológicos se ha demostrado que un aumento del 2 % en los AGT resulta en uno significativo en el riesgo relativo (RR) de EAC. Los datos del Estudio de la Salud de las Enfermeras muestran que, en relación con los carbohidratos, un 5 % en AGS resultó en un incremento no significativo en el CHD, mientras que aumentos similares en MUFA o PUFA fueron relacionados con reducciones significativas. Sin embargo, reemplazar el 2 % de las calorías de carbohidratos con MUFA resultó en una duplicación importante del riesgo de EAC. Un análisis posterior de datos de la misma cohorte, evaluó el riesgo de diabetes tipo II. Nuevamente, reemplazando el 5 % de las calorías de carbohidratos con PUFA se obtuvo una reducción significativa, mientras que intercambios similares con AGS y MUFA no tuvieron ningún efecto. De nuevo, reemplazar el 2 % de las calorías de carbohidratos con MUFA se asoció a un riesgo significativo. Por lo tanto, los resultados de estos (y otros) estudios son importantes impulsores de los mensajes de salud pública que abogan por reemplazar los AGT y AGS con ácidos grasos insaturados, especialmente cuando el enfoque es el LDL-C.

Los datos anteriores han sido confirmados en gran medida por estudios a más largo plazo. Al evaluarlos, a 20 años del Estudio de la Salud de las Enfermeras, se encontró que el consumo de AGT de 1,6 a 2,8 % del total de calorías aumentó el riesgo de EAC en 30 %; mientras que el consumo de

PUFA en el rango de ~ 4-7 % de calorías resultó en un riesgo significativamente menor. Una observación fue que la ingesta de AGS de 12 al 18 % de calorías no estaba asociada directamente con el riesgo de EAC. Aunque interesante, la observación fue poco conocida, ya que la mayoría de agencias de salud habían estado promoviendo consumos de AGS de ~10 % de las calorías totales. Como consecuencia de estos estudios epidemiológicos, el reemplazo de AGS con PUFA, se volvió un mensaje frecuentemente promocionado.

Sin embargo, en los últimos años varias investigaciones grandes y bien publicadas han cuestionado el papel que se le ha asignado a los AGS. Han demostrado que estos no tienen impacto sobre los ECV o que sus efectos beneficiosos eran reemplazados por PUFA o carbohidratos de GI bajo. Estudios más recientes, incluyendo uno de Canadá mostraron que el consumo de AGS no estaba relacionado con la mortalidad por toda causa, EAC, ECV, ACV o diabetes tipo 2. En contraste, otros estudios evaluaron los efectos de reemplazar el 5 % de calorías de AGS con una forma equivalente de MUFA o PUFA sobre la mortalidad total, y encontró reducciones significativas. La historia se volvió más confusa cuando, en 2017, se publicaron datos de más de 135.000 individuos de 18 países que revelaron que un alto consumo de AGS estaba relacionado con un menor riesgo de ACV, mientras que ninguna clase de ácidos grasos tenía conexión con mortalidad por infarto al miocardio (MI) o ECV. De hecho, solo los consumos altos de carbohidratos fueron asociados con un mayor riesgo de mortalidad.

Recientemente, un meta-análisis en red, comparó los efectos de varios aceites y grasas en las concentraciones de LDL, HDL Y TG. Revelaron que la grasa/aceite ideal para lograr el resultado deseable dependía del parámetro de interés. Por lo tanto, el aceite de cártamo produjo los mejores resultados en términos de LDL, mientras que el aceite de coco y el de palma los mostraron para HDL Y TG, respectivamente.

Efectos del aceite/oleína de palma en la proporción de TC/HDL-C

Se ha encontrado que la oleína de palma (la fracción líquida del aceite de palma), produce efectos similares en la proporción de TC/HDL-C en compara-

ción con dietas que incluyen aceite de oliva, de soja o de canola. Si bien algunos estudios observaron un LDL-C mayor con la oleína de palma, ninguno encontró algún efecto sobre la proporción TC/HDL-C. Esto también fue observado por una investigación en Colombia que equiparó una dieta basada en aceite de oliva extra virgen con una en aceite de palma híbrida. Esta tenía un menor contenido de ácido palmítico y ácido esteárico, y uno mayor de ácido oleico que la palma tradicional.

Recientemente, dos meta-análisis evaluaron los efectos del aceite de palma sobre el perfil lipídico en plasma. Uno observó efectos adversos sobre el LDL, mientras que el otro no los percibió sobre la relación TC/HDL-C. En el caso de este último, el análisis final incluyó un total de 51 estudios con 1.526 personas de 15 países. Se compararon los resultados del aceite de palma para: a) ácido esteárico, b) ácidos láurico + mirístico, c) MUFA, d) PUFA, y e) ácidos grasos trans de aceite de palma alto oleico (PHVO), respecto a los efectos sobre el TC, LDL-C, HDL-C, apo B (una medida del número de partículas de LDL), apo AI (medida del número de partículas de HDL), VLDL-C, triglicéridos (TG) en plasma, LDL-C/HDL-C, TC/HDL-C y lipoproteína(a) [Lp(a)]; un factor independiente de riesgo de ECV.

Aceite de palma como sustituto de las grasas trans

Si bien la discusión se ha enfocado principalmente en el papel de las lipoproteínas plasmáticas en relación con la EAC, esta última se ve afectada por varios factores que incluyen un LDL-C elevado, la proteína C-reactiva (PCR), Lp(a), la relación ApoB/apoA1 y bajos niveles de HDL-C. Por lo tanto, enfocarse en un parámetro específico puede llevar a conclusiones divergentes. Así, todos los AGS aumentan el LDL-C (con la excepción del ácido esteárico) haciéndolos no deseables, mientras que el AGS reduce la Lp(a) y eleva el HDL-C haciéndolo beneficioso. Si bien estos pueden ser importantes por derecho propio, el principal punto final, por supuesto, es la EAC. En este aspecto, el estudio de Mozaffarian & Clark (2009) es de gran interés. Los autores evaluaron los efectos de reemplazar los aceites vegetales parcialmente hidrogenados (que contienen 20 %, 30 % y 45 % de ácidos grasos trans) con grasas y aceites específicos, incluyendo

aceite de palma, aceite de soja, mantequilla, manteca, aceite de cártamo alto oleico y aceite de canola, sobre el CHD. Llevaron el estudio un paso más allá al estimar el riesgo de EAC de acuerdo con la contribución de TC/HDL-C, Lp(a), la proteína C-reactiva y la relación apoB/apoA. Utilizando este análisis compuesto, al reemplazar el 7,5 % de energía de aceite vegetal parcialmente hidrogenado (con 45 % de contenido de MUFA) con aceite de palma, redujo el riesgo de EAC en ~30 %, mientras que la cifra para los aceites altamente insaturados (soya o canola) era más cercana al 40 %. De hecho, este estudio mostró que la eliminación de ácidos grasos trans y su reemplazo con cualquier grasa, mejora los resultados para la salud.

Esto invariablemente conduce a la pregunta de cuánto aceite de palma puede incorporarse fácilmente en la dieta. Los cálculos teóricos basados en la composición de los ácidos grasos revelan que, para una dieta con el 30 % de calorías de grasas totales y un contenido deseado de AGS del 10 % de las calorías, el 72 % de las grasas totales puede ser aceite de palma. Si se reducen los AGS en 5 % (del 10 % al 5 % de calorías), y se reemplaza con una cantidad igual de calorías de MUFA o PUFA, entonces la medida de aceite de palma que se puede utilizar es el 32 % de las grasas totales. Si simplemente se elimina el AGS (y no se reemplaza con ninguna grasa), entonces la cantidad de aceite de palma es 43 % de la grasa total.

Aceite de palma rojo para combatir la deficiencia de vitamina A

Además de la composición de ácidos grasos, el fruto de la palma de aceite contiene una cantidad significativa de carotenoides (500-700 ppm). De hecho, la actividad de la "vitamina A" del aceite de palma rojo es sustancialmente mayor a la de las zanahorias, tomates y verduras de hoja. La gama de carotenoides es diversa, aunque β y α carotenos son los principales componentes. Como tal, este aceite ha sido utilizado en numerosos estudios con intervención humana para combatir la deficiencia de vitamina A. Los enfoques usados incluyeron la fabricación de productos de confitería y galletas locales con aceite de palma rojo, cocinar las verduras de hoja en aceite rojo de palma o simplemente, administrarlo oralmente. El requerimiento de vitamina A también se puede mejorar en

mujeres embarazadas y en lactancia, suministrando aceite de palma rojo como parte de la dieta. Recientemente hay dos artículos de interés. En uno, pacientes con fibrosis quística fueron suplementados con aceite de palma rojo y se observaron aumentos significativos en los niveles de carotenoides en plasma. Adicionalmente, un meta-análisis de estudios que evalúa la capacidad del aceite de palma rojo para mejorar los parámetros de la deficiencia de vitamina A encontraron beneficios significativos con su consumo.

Tocotrienoles de palma

El aceite de palma crudo también es una de las fuentes más ricas de vitamina E (600-1000 ppm). Esta vitamina, conformada por ocho componentes relacionados estructuralmente, principalmente α -, β -, γ -, δ - tocoferol y α -, β -, γ -, δ - tocotrienol, está presente en varias fuentes alimentarias, tales como nueces, semillas y aceites vegetales. Si bien los tocoferoles predominan en el aceite de oliva, girasol, maíz y soya, los tocotrienoles lo hacen en la cebada y salvado de arroz, siendo el aceite de palma crudo la mayor fuente de tocotrienoles. El contenido de estos en la fracción rica en tocotrienoles (TFR, por su sigla en inglés) del aceite de palma está entre 70 y 80 %, principalmente compuesto de γ - (46 %) y α - tocotrienoles (22 %).

A diferencia de los estudios en pro de la actividad de la vitamina A discutidos antes, donde se utiliza el aceite de palma especialmente para extraer su contenido de β -caroteno, los estudios que exploran sus propiedades de vitamina E se han realizado usando una fracción enriquecida de esta vitamina (principalmente, en tocotrienoles) derivado del aceite de palma. Los datos sobre TRF y tocotrienoles han aumentado de manera rápida en las últimas dos décadas y han sido

empleados en una amplia gama de tratamientos para el manejo de ECV, ACV, cáncer y procesos neurodegenerativos. Un estudio reciente evaluó el TRF en enfermos con neuropatía diabética, y observó mejoras en un subconjunto de pacientes con dolor punzante.

Compuestos fenólicos de la palma de aceite

De manera similar a las aceitunas, el fruto de la palma es una fuente rica de compuestos solubles en agua, incluyendo polifenoles. Con la comercialización de un proceso para extraer los compuestos fenólicos de la palma de aceite, varios estudios en animales y en modelos de cultivos de células han reportado la eficiencia de los fenólicos de la palma de aceite en varias “enfermedades”. A comienzos de año se reportó la primera investigación de fase I en humanos sobre la seguridad de los suplementos de fenólicos de la palma de aceite. Estos fueron bien tolerados y no produjeron efectos adversos, abriendo el camino para emocionantes estudios en el futuro, que se volverán viables una vez los fenólicos sean comercializados y se pongan a disposición para el consumo humano.

Conclusión

El aceite de palma satisface varias necesidades nutricionales. Su consumo lo hace un actor importante a nivel mundial en términos de seguridad alimentaria. Su perfil de ácidos grasos elimina la necesidad de hidrogenación. Los varios componentes menores ayudan a aliviar las deficiencias de micronutrientes, utilizando enfoques basados en alimentos y son prometedores como medidas preventivas en ciertas enfermedades crónicas.

Referencias

- Mensink, R. P., Zock, P. L., Kester, A. D., & Katan, M. B. (2003). Effects of dietary fatty acids and carbohydrates on the ratio of serum total to HDL cholesterol and on serum lipids and apolipoproteins: a meta-analysis of 60 controlled trials. *American Journal of Clinical Nutrition*, 77(5), 1146-1155.
- Mozaffarian, D., & Clarke, R. (2009). Quantitative effects on cardiovascular risk factors and coronary heart disease risk of replacing partially hydrogenated vegetable oils with other fats and oils. *European Journal of Clinical Nutrition*, 63(Suppl. 2), S22-33.

Reequilibrando la imagen del aceite de palma en Europa*

Rebalancing the Image of Palm Oil in Europe



FRANS CLAASSEN

Presidente de la Alianza Europea para el
Aceite de Palma, EPOA
Chair European Palm Oil Alliance

CITACIÓN: Claassen, F. (2019). Reequilibrando la imagen del aceite de palma en Europa. *Palmas*, 40 (Especial Tomo I), 40-45.

PALABRAS CLAVE: aceite de palma, sostenibilidad, imagen, ODS, colaboración.

KEYWORDS: Palm oil, sustainability, image, rebalancing, SDG, cooperation.

*Artículo original recibido en inglés y traducido por Carlos Arenas París.

Resumen

La Alianza Europea para el Aceite de Palma (European Palm Oil Alliance, EPOA) es una iniciativa privada de productores de aceite de palma y refinadores europeos que participan en la industria de los alimentos e informan a las partes, gobiernos, políticos, a las ONG y medios de comunicación sobre la historia completa del aceite de palma. El deseo de la EPOA es crear una visión equilibrada y objetiva acerca de los aspectos nutricionales, de sostenibilidad y funcionales del aceite de palma. El aceite de palma sustentable contribuye a una serie de Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), como la acción climática y el desarrollo socioeconómico. La EPOA colabora, respalda y coordina de cerca sus actividades con 10 iniciativas nacionales de aceite de palma sustentable que trabajan en diferentes países europeos, facilitando la comunicación basada en la ciencia y creando una visión equilibrada sobre los aspectos nutricionales y la sustentabilidad del aceite de palma. Apoyados por la Iniciativa Comercio Sostenible (IDH) y en estrecha colaboración con ella, trabajamos con las iniciativas nacionales encaminadas a alcanzar un mercado de

aceite de palma 100 % sostenible en Europa para el año 2020. Con el fin de garantizar la plena comprensión de los temas, hemos creado una serie de herramientas científicas de comunicación. Puesto que vemos un incremento estable del aceite de palma sostenible proveniente de Colombia y América Latina hacia Europa, la EPOA desea fortalecer la cooperación con los productores latinoamericanos de aceite de palma.

Abstract

The European Palm Oil Alliance (EPOA) is a private initiative of palm oil producers and European refiners to engage with and educate stakeholders within the food industry, governments, politicians, NGO's and media on the full palm oil story. Our EPOA ambition is to create a balanced and objective view on the nutritional, sustainability and functional aspects of palm oil. Sustainable palm oil contributes to a number of the Sustainable Development Goals (SDG's) like climate action and socio-economic development. EPOA closely collaborates, supports and coordinates activities with 10 national sustainable palm oil initiatives active in the different European countries, facilitating science based communication and creating a balanced view on the nutritional and sustainability aspects of palm oil. Supported by and in close cooperation with the Sustainable Trade Initiative (IDH) we work together with the national initiatives towards a 100% sustainable palm oil market in Europe in 2020. To ensure a good understanding on the topics, we have created a variety of science-based communications tools. As we see a steady increase of Sustainable palm oil from Colombia and Latin America towards Europe, EPOA is looking forward towards strengthening the cooperation with the Latin-America palm oil producers.



Introducción

El uso de aceite de palma en alimentos está cayendo en Europa debido a una percepción negativa de este aceite vegetal. El motivo es la falta de conocimiento e información sobre su producción y sus aspectos nutricionales, funcionales, de versatilidad y de sostenibilidad. Reequilibrar el debate es posible y necesario, pero para lograrlo se requieren tres elementos clave: i) una narrativa proactiva sobre la contribución positiva y el progreso de la palma de aceite sostenible a los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU, ODS; ii) acciones más concretas y la adopción de aceite de palma sostenible certificado en los grupos de interés europeos (industria alimentaria, minoristas y gobiernos); y iii) la limpieza de nuestra cadena de suministro, deshaciéndonos de las prácticas no sostenibles en el aceite de palma. Si este continúa relacionándose con la deforestación, será imposible mejorar la imagen de toda la industria.

Como exdiplomático del gobierno holandés, tuve el placer de vivir y trabajar en Indonesia y Malasia durante cinco años a comienzos de este milenio.

Desde ese entonces he estado activamente involucrado en el debate internacional del aceite de palma sostenible. Debo admitir que la visita a Cartagena en septiembre de 2018 fue mi primera vez en Colombia, el cuarto productor a nivel mundial de aceite de palma. Quiero agradecer a Fedepalma por invitarme y por tener la amabilidad de organizar, junto con Oleoflores, un encuentro con los productores y recorridos por una plantación y una planta de beneficio, de manera que ahora entiendo mucho mejor los detalles y aspectos diferenciales de la producción de aceite de palma en Colombia.

En los siguientes apartados quisiera referirme a los cuatro pilares fundamentales de la estrategia para reequilibrar la imagen del aceite de palma en el mercado europeo, los cuales son: i) las importaciones del aceite de palma a Europa; ii) la imagen del aceite de palma en Europa; iii) el trabajo de la Alianza Europea del Aceite de Palma (EPOA); y iv) los elementos necesarios para reequilibrar la imagen de este aceite en el mercado de Europa.

El primer pilar: las importaciones del aceite de palma a Europa

Las importaciones de aceite de palma a la Unión Europea (UE) han experimentado un aumento constante a lo largo de los años. En 2011, fue de cinco millones de toneladas de aceite de palma, y en 2017 el total creció a 7.2 millones de toneladas. Todos sabemos que esto se debe principalmente a las políticas de biocombustibles de la UE. Durante el mismo periodo, hemos visto un fuerte incremento en las importaciones de aceite de palma de Latinoamérica hacia Europa. Las cifras muestran que Colombia es el principal proveedor latinoamericano para este continente. Y, si miramos los primeros siete meses del 2018, vemos un aumento constante de esta posición, cercano al 10 %. La participación total de Latinoamérica en las importaciones hacia la UE ha crecido del 4 % en 2012 al 15 % en el 2018.

Aunque con el paso de los años vemos un crecimiento en las importaciones de aceite de palma hacia la UE, hay una reducción clara y significativa (de entre el 5 % y el 10 % anual) en su uso en productos alimenticios en Europa.

El segundo pilar: la imagen del aceite de palma en Europa

Anualmente se realiza una investigación extensiva de los consumidores: el Estudio Kantar. Y quisiera compartir con ustedes las principales conclusiones de este informe de abril de 2018. La investigación se llevó a cabo en 17 países de todo el mundo, 1.000 entrevistados en cada uno. El enfoque es la percepción de los consumidores sobre el aceite de palma y, más específicamente, sobre los impactos sociales, ambientales y para la salud.

El estudio muestra que, en muchos países de Europa, el aceite de palma es visto como el menos saludable. Al igual que en investigaciones anteriores respecto a la percepción negativa sobre la salud de las personas, los entrevistados hacen referencias genéricas tales como “lo he escuchado/leído” y “es dañino/malo para tu salud”. Esto está aumentando en Alemania y disminuyendo en Bélgica. Se muestra así que el aceite

de palma, como producto y/o como ingrediente, es desconocido para los consumidores, que construyen su opinión con base en la información limitada que han recibido de los medios y del debate público.

El estudio también revela que la mayoría de consumidores europeos consideran que el aceite de palma es el de mayor impacto ambiental. Y vemos la misma tendencia en cuanto a la percepción de los consumidores sobre el impacto social. Después de Francia, Bélgica e Italia, la percepción negativa sobre el aceite de palma se ha esparcido a los otros países de Europa. Respecto a los tres temas (salud, medioambiente e impacto social) es alta en Austria y España (en el mismo nivel que Italia y Francia), y está aumentando significativamente en España y Alemania.

Las principales conclusiones de este estudio son que en España y Austria la situación es crítica; en España, el fenómeno en general está aumentando en todos los aspectos; en los países clave: Italia, Francia y las comunidades francófonas de Bélgica, la percepción negativa continúa siendo un problema porque el conocimiento del aceite de palma es alto, así como la percepción de este con respecto a la salud, el medioambiente y los aspectos sociales.

Como ustedes probablemente saben, la imagen del aceite de palma en Europa ha sufrido ataques severos durante muchos años. Creo que esto está relacionado con varios aspectos, de los que quiero resaltar dos. Primero, la palma de aceite y el aceite de palma como producto y/o ingrediente, y su industria, son desconocidos en Europa. Tenemos un dicho en holandés que reza “Lo desconocido no es amado”, y creo que esto es una parte de la razón. A lo largo de los años hemos visto un flujo continuo y una amplia gama de reportes negativos por parte de muchas ONG y medios de Europa. No considero que culpar a otros por publicar estos informes nos ayude. Creo en la importancia de la transparencia. Lo que nos ha faltado es un mensaje fuerte y alineado, y una respuesta de la industria del aceite de palma sobre “nuestro” papel en la historia. El hecho es que muchos actores de esta industria se han tomado en serio las señales de los consumidores y el público, y precisan que divulguemos las acciones, los impactos y desarrollos positivos del aceite de palma sostenible en la cotidianidad.

Los informes de monitoreo muestran que la imagen o, mejor dicho, la percepción del aceite de palma en muchos países europeos es negativa debido a problemas como la sostenibilidad, la salud y la seguridad alimentaria, y los aspectos sociales. Con la consecuencia de que muchos políticos, gobiernos, y también la industria alimentaria, no quieren ser asociados con una industria, un producto o un ingrediente que es presentado constantemente de forma negativa. Y, aunque con el paso de los años vemos un crecimiento lento en las importaciones de aceite de palma hacia la UE, hay una reducción clara y significativa en el uso del aceite de palma en productos alimenticios.

Pero también hay un mensaje positivo. En esos países europeos en los que la EPOA ha establecido una estrategia de apoyo y comunicación, vemos que podemos detener la tendencia negativa. Entonces, confío en que reequilibrar la imagen con base en hechos, cifras y una narrativa positiva sobre los impactos del aceite de palma sostenible sobre la tierra, es posible. Igualmente, creo que si queremos detener, o incluso revertir, la tendencia negativa en toda Europa, lo que implica mejorar la imagen del aceite de palma. ¡Aún falta mucho trabajo!

Tercer pilar: el papel de la Alianza Europea del Aceite de Palma (EPOA)

Esta es una iniciativa de los refinadores europeos de aceite de palma, que recibe el apoyo de los productores de Indonesia, a través de Indonesian Palm Oil Association (GAPKI IPOA), y los de Malasia con Malaysian Palm Oil Council (MPOC).

La EPOA cree que el aceite de palma sostenible es clave para ayudar a alimentar al mundo, para proteger la biodiversidad y la vida silvestre, para mejorar el desarrollo socioeconómico y contribuir a lograr los ODS de la ONU. La EPOA impulsará la transformación sostenible del mercado del aceite de palma en Europa y reestablecerá su imagen en los alimentos. Nuestro papel es interactuar y educar a todos los grupos de interés sobre la historia completa del aceite de palma. Queremos contribuir con la creación de una opinión equilibrada sobre sus aspectos nutricionales, funcionales, versátiles y de sostenibilidad. Consideramos que el aceite de palma 100 % sostenible es la solución adecuada y pondremos de nuestra parte para transformar el mercado europeo de este, en alimentos y pien-

Figura 1. Iniciativas europeas de aceite de palma sostenible.



sos. Los miembros de la EPOA trabajamos estrechamente y apoyamos las iniciativas nacionales de aceite de palma sostenible, con actividad en 10 países de Europa (Figura 1).

Las industrias europeas de la palma de aceite, de los alimentos y del comercio minorista, se han comprometido a que, para 2020, comprarán aceite de palma 100 % sostenible. Como no podemos hacer esto solo, la EPOA, junto con nuestro aliado IDH, una iniciativa de comercio que funciona por medio del proyecto Aceite de Palma Sostenible Europeo (ESPO, por sus siglas en inglés), trabajamos con propuestas nacionales para hacer que dichos compromisos se vuelvan realidad. Explicamos la importancia del aceite de palma sostenible y apoyamos la compra de Aceite de Palma Sostenible Certificado (CSPO, por sus siglas en inglés). Anualmente, reportamos el progreso logrado en el mercado europeo respecto al consumo de CSPO. En la actualidad, siete gobiernos europeos han aceptado las iniciativas y han firmado una carta de apoyo. Esto es lo que llaman la Declaración de Ámsterdam.

Cuarto pilar: qué se necesita para reequilibrar la imagen

Quiero resaltar la urgencia de una acción colectiva y alineada si queremos detener la imagen negativa del uso del aceite de palma en tendencias alimenticias en Europa. En aquellos países donde establecimos una estrategia de comunicación como EPOA, junto con nuestras alianzas nacionales que incluyen la industria alimenticia local y los grupos de interés, vemos que la tendencia negativa se ha detenido. Entonces, confío en que es posible revertirla. Pero, ¡todavía hay mucho por hacer!

Entonces, si me preguntan: ¿Qué se necesita para detener la tendencia negativa y reequilibrar el debate? Tengo tres sugerencias:

1. Una narrativa proactiva sobre el aporte positivo y el progreso de la palma de aceite sostenible a los ODS de la ONU. Como todos sabemos, el aceite de palma es importante para el desarrollo socioeconómico de muchos países productores. Y este es especialmente el caso de Colombia. El aceite de palma mantiene a millones de pequeños produc-

tores en todo el mundo, genera trabajo e ingresos en áreas rurales y el que es sostenible también ayuda a detener la deforestación y a proteger la vida silvestre. Sabemos que muchos grupos de interés en la cadena de suministro son muy activos en hacer que la industria del aceite de palma sea más sostenible. Normas voluntarias como RSPO, ISCC, así como compromisos corporativos como NDPE y Tableros de Trazabilidad de los productores y refinadores, aumentan la transparencia en la cadena de suministro. Existen acuerdos y acciones claras para ayudar a los pequeños productores, introducir esquemas de resiembra y comenzar proyectos en áreas de fuentes verificadas.

Es necesario explicar nuestros compromisos con el aceite de palma sostenible; necesitamos informar proactivamente los desarrollos positivos, el progreso que se logra y, al mismo tiempo, reconocer que, en algunos casos, aún hay mucho trabajo por hacer.

2. Lograr acciones más concretas de los grupos de interés y una mayor adquisición de aceite de palma sostenible por parte de los usuarios finales en Europa. En la Conferencia Europea sobre Aceite de Palma, EPOC 2018, presentamos un nuevo informe de monitoreo sobre el proyecto de Aceite de Palma Sostenible Europeo (ESPO), iniciativa de la Industria Holandesa de Aceites y Grasas (MVO) y el IDH. Dicho informe muestra que, en 2017, el 74 % del aceite de palma importado a Europa para alimentos, era certificado sostenible (CSPO). Igualmente, que el 84 % del mismo es adquirido bajo políticas de No Deforestación, No Turba y No Explotación (NDPE). En total, el 99 % era trazable a la planta de beneficio de aceite de palma. Esto significa que muchas cosas han cambiado en los últimos años respecto a la trazabilidad y transparencia de nuestra cadena de suministro. Dado que los volúmenes absolutos de aceite de palma sostenible están aumentando, es importante incentivar una mayor demanda en toda la cadena de valor. Esto es necesario para lograr la meta del 2020 en la declaración conjunta por parte de organizaciones, gobiernos y el sector privado. Una de las maneras para apoyar el desarrollo sostenible en los países productores, es comprar créditos agrícolas especiales para los pequeños productores independientes. Por primera vez, el informe de monitoreo

de ESPO también proporciona datos sobre la compra de estos créditos ofrecidos por la Mesa Redonda Sobre Aceite de Palma Sostenible (RSPO), que actualmente es de 8.100 toneladas.

Con el 74 % de las importaciones totales de aceite de palma cubiertas por CSPO, aún existe una brecha entre los compromisos y las acciones. Entonces, la EPOA hace un llamado para que la industria alimentaria, los comercios minoristas y los gobiernos europeos implementen sus compromisos y también apoyen los desarrollos en aceite de palma sostenible en los países productores.

3. Tercero, pero no menos importante. Nosotros, la industria del aceite de palma, debemos limpiar nuestra cadena de suministro y deshacernos de las prácticas no sostenibles. Si tan solo una minoría de los productores o de la industria del aceite de palma no cumplen con los requisitos mínimos de sostenibilidad, y si la deforestación continúa aumentando, será imposible mejorar la imagen. Aplaudimos el hecho de que muchos actores de esta industria y los gobiernos de países productores como Indonesia, Malasia, e incluso Colombia, están asumiendo la responsabilidad y desarrollando e implementando normas obligatorias para elevar los estándares. Aplaudimos a los productores colombianos de aceite de palma, especialmente también a Fedepalma, al Gobierno colombiano y a las ONG por ser los primeros en el mundo en llegar a un acuerdo para cero

deforestación bruta. Pero al mismo tiempo, insto a todos para que tomen en serio este trabajo.

Sabemos que nuestra industria no será juzgada por nuestros compromisos, pero sí por nuestras acciones. Dicho esto, me gustaría resaltar la urgencia de actividades colectivas y alineadas, si queremos detener esta tendencia negativa de la imagen del aceite de palma y de su consumo en alimentos. Sí, creo que es posible, pero hay mucho por hacer. Y no hay tiempo que perder. Tenemos que actuar ahora.

La EPOA y los productores de aceite de palma como Indonesia, Malasia y Colombia, tienen un interés en común. Necesitamos informar el impacto positivo del aceite de palma sostenible de forma proactiva, y para esto:

- Estamos obligados a trabajar juntos más intensamente.
- Debemos poner los recursos a disposición de todos para poder contar nuestra historia correctamente.
- Precisamos actuar en conjunto con nuestras ONG aliadas y constructivas.
- Tenemos que comenzar hoy.

La EPOA espera fortalecer la cooperación con los productores colombianos, Fedepalma y todos los otros grupos de interés para hacer que el aceite de palma sea un aceite vegetal sostenible y respetado en Europa y en el mundo.

Referencias bibliográficas

Ministry of Foreign Affairs (2017). *The Amsterdam Declaration in Support of a Fully Sustainable Palm Oil Supply Chain by 2020*. Recuperado de [https:// www.euandgvc.nl/documents/publications/2015/december/7/declarations-palm-oil](https://www.euandgvc.nl/documents/publications/2015/december/7/declarations-palm-oil)

European Palm Oil Alliance (2018). *EPOC 2018 Cerrando la brecha: compañías de alimentos, minoristas y gobiernos llamados para acelerar sus acciones sobre el aceite de palma sostenible*. Recuperado de [https:// www.palmoilandfood.eu/en/news/epoc-2018-closing-gap-food-companies-retail-governments-called-step-their-actions-sustainable](https://www.palmoilandfood.eu/en/news/epoc-2018-closing-gap-food-companies-retail-governments-called-step-their-actions-sustainable)

Oferta y demanda global: perspectivas de los aceites y las grasas en la próxima década*

Global Supply and Demand: Outlook for Oils and Fats over the Next Decade



JAMES FRY

Presidente LMC International Ltd.
Chair LMC International Ltd.
Reino Unido

CITACIÓN: Fry, J. (2019). Oferta y demanda global: perspectivas de los aceites y las grasas en la próxima década. *Palmas*, 40 (Especial Tomo I), 46-54.

PALABRAS CLAVE: aceite de palma, crecimiento en la demanda de aceite, plantaciones de palma de aceite, tendencias de rendimiento, pronósticos de precios.

KEYWORDS: Palm oil, growth in oil demand, oil palm plantations, yield trends, price outlook.

*Artículo original recibido en inglés y traducido por Carlos Arenas París.

Resumen

El documento iniciará abordando el crecimiento de la demanda mundial de aceites y grasas desde el año 2000, abarcando el período desde el surgimiento de los biocombustibles. Además, tratará la forma como está cambiando el equilibrio entre los distintos usuarios finales del sector y comparará el crecimiento de la demanda global de aceite con el de las harinas de oleaginosas, ahondando en las implicaciones para los distintos cultivos de aceites. Las reflexiones más destacadas de este artículo tratan los cambios en las tasas de crecimiento que se presentan en el sector del biodiésel, cuyo desarrollo se analizará en más detalle. Además, se presentarán proyecciones de la demanda hasta 2030 y se examinará el efecto que tendrán sobre el equilibrio de los principales cultivos de aceite, junto con un análisis de la producción de aceites vegetales durante los últimos 40 años con énfasis en la palma de aceite como principal fuente de oferta. Se analizarán en el tiempo las tendencias de los rendimientos por hectárea, comparando los productores del Sudeste Asiático con

Colombia y se abordará el impacto de los límites impuestos al crecimiento de las zonas palmeras, destacando el papel de la soya para suplir cualquier reducción en la producción de aceite de palma crudo. Por último, se da a conocer una mirada a las implicaciones para las perspectivas a largo plazo de los precios del aceite de palma a nivel mundial.

Abstract

This paper will first review the growth in world demand for oils and fats since 2000, covering the period since the emergence of biofuels. It will review how the balance between different end-use sectors is changing. The growth in global demand for oils will be contrasted with that for oilseed meals, with a discussion of the implications for different oil crops. The biggest changes in growth rates are in the biodiesel sector, whose development will be discussed in some detail. Forecasts of demand will be presented out to 2030, with an assessment of the way in which they will affect the balance between the major oil crops. The production of vegetable oils will be described over the past 40 years, highlighting the emergence of oil palm as the major source of supply. The trend in yields per hectare will be analyzed over time, contrasting South East Asian producers with Colombia. The impact of limits on growth in oil palm areas will be revealed, highlighting the role of soybeans in meeting any shortfall in CPO output. This article will end with a discussion of the implications for the longer-term prospects for palm oil prices.

Introducción

Desde el 2000, el crecimiento de la demanda de aceites ha estado por encima que el de la torta de semillas oleaginosas. Esto refleja el cambio en el equilibrio entre los principales usos finales de los aceites, especialmente los alimentos y los biocombustibles; estos últimos, tomando la iniciativa en el aumento de la demanda mundial de aceites vegetales. Las tasas de crecimiento en la demanda de aceites vegetales en estos sectores líderes de uso final, se desacelerará entre 2018 y 2030 como consecuencia de una disminución del apoyo político en la UE y EE.UU. El aceite de palma, como el cultivo más productivo en términos de rendimientos de aceite y con poca torta de subproductos, está muy bien ubicado para satisfacer los patrones distintivos del crecimiento en la demanda desde el 2000. Ahora, es la mayor fuente de aceites vegetales, por mucho.

Un aspecto en el que la palma de aceite ha tenido un desempeño pobre es en sus tendencias de rendimiento en la producción de APC por hectárea madura, que ha quedado muy por debajo de las de los cultivos oleaginosos anuales. Ha habido una desaceleración marcada en el crecimiento del área de palma de aceite, parcialmente debido a presiones por una moratoria sobre la siembra. El único cultivo que puede compensar de manera realista el déficit en el suministro de aceite ocasionado por la desaceleración en la producción futura de APC, es la soya, pero su expansión ocasionará una creciente presión ambiental en las áreas de América del Sur, incluyendo los bordes de la selva tropical del Amazonas.

Con el fin de impulsar la siembra de soya y permitirle suministrar el aceite que, en el pasado, se habría derivado de la palma de aceite, el precio de la soya tendría que subir. Sin embargo, la torta adicional que se produciría bajaría el valor. Es inevitable que los precios mundiales de los aceites vegetales (incluyendo el APC)

tendrían que ser mucho más altos que lo que sería de otra manera, con el fin de garantizar que el precio promedio de la soya suba para atraer suministros extra.

El equilibrio cambiante entre la demanda de aceite y la torta oleaginosa

Hasta el 2000, la demanda mundial de aceites vegetales creció al mismo ritmo que la de la torta de semillas oleaginosas. Por consistencia, la demanda de tortas en la Figura 1 se expresa con el 48 % del contenido proteico de la torta de soya, de manera que una tonelada de torta de canola al 36 % de proteína es tratada como equivalente a 0,75 toneladas de torta de soya. Nótese que la escala de tortas en la Figura 1 es exactamente el doble de la de aceite. Después del 2000, la demanda de aceites se aceleró, mientras que la de tortas continuó creciendo a un ritmo constante. Esto se debe a los biocombustibles que, a diferencia de los ingresos crecientes, crea una demanda de aceites que no es equivalente a la de la carne (que hace crecer la demanda de torta).

El equilibrio entre los principales usos finales de aceites

La Figura 2 muestra que la demanda de aceites por parte de la industria de alimentos ha seguido creciendo en aproximadamente 4 % desde el 2000. Por su parte, la categoría “Otros usos industriales”, que abarca principalmente oleoquímicos, aunque también incluye alimentos para animales, etc., vio una desaceleración en su crecimiento después del periodo 2000-2010. En cuanto a la categoría “biocombustibles”, es necesario hacer una distinción entre “biocombustibles impulsados por políticas” y biocombustibles como un todo. Esto, porque en el piso de la banda de precios del aceite de palma, que es donde nos encontramos hoy con el APC más barato que el crudo en el Sudeste Asiático, el uso de biocombustibles no subsidiado y discrecional aumenta, por fuera de los mandatos gubernamentales. La demanda de biocombustibles impulsada por políticas creció más del 10 % en el periodo 2010-2017, bajando de un espectacular 17 % en el 2000-2010.

Figura 1. Comportamiento de la demanda mundial de aceite y torta (1974-2016).

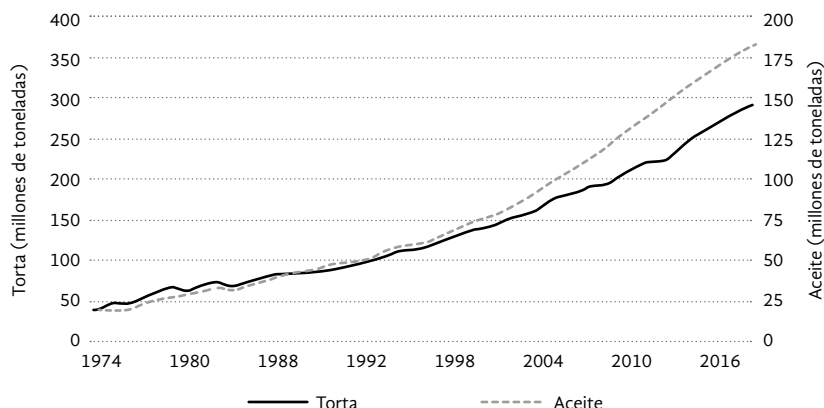
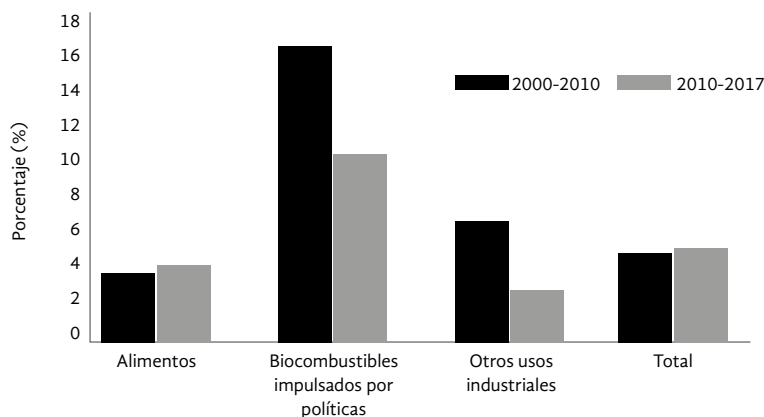


Figura 2. Crecimiento de la demanda de aceite a nivel mundial.



Pronósticos de la demanda de aceite en estos sectores líderes de uso final hasta el 2030

Por una variedad de razones, el crecimiento de la demanda en los dos principales usos finales de aceites, los alimentos y biocombustibles, será más lento en los próximos 12 años (Figura 3). En los usos alimentarios, algunas de las economías ricas están llegando a una meseta en su demanda per cápita; igualmente, la demografía y nuevas culturas de consumo también son un factor. Como resultado, el crecimiento de la demanda para alimentos bajará al 3 % anual.

Se espera que el uso de aceites en los biocombustibles, impulsados por políticas, baje al mismo nivel que la demanda para alimentos, con un crecimiento concentrado en Indonesia y Brasil. En este momento, el APC barato vs. el petróleo está impulsando la producción de biodiésel, pero esto no durará. Los nuevos patrones de demanda llevarán el crecimiento total anual en el uso del aceite por debajo del 3 %.

La producción de carne avanza constantemente hacia un uso más intensivo de proteínas, lo que significa que la demanda de tortas de semillas oleaginosas crece más rápidamente que esta, pero se espera que ambas disminuyan en el futuro. Esto es muy importante para los aceites en general, dado que la soja es la segunda fuente en el mundo, después de la palma de aceite. Si el crecimiento de la demanda de torta es inferior al de los aceites, significa que la trituration

de soja, liderada por la demanda de torta, hará que el suministro de aceite de soja se atrase con respecto al crecimiento de la demanda general de aceite vegetal. Esto plantea la pregunta de cómo el mercado llenará la brecha en la oferta para igualar el aumento en la demanda total de aceites. La respuesta a esta pregunta es el tema principal que se trata a continuación.

La respuesta de los diferentes cultivos oleaginosos al crecimiento en la demanda

No hay duda de que durante los últimos 40 años los cultivos oleaginosos han gozado de un rápido ritmo de crecimiento en su producción como se muestra en la Figura 4 (las cifras son por año de cultivo, lo que suaviza el impacto del fenómeno El Niño). La palma, tanto en forma de APC como en PKO, tiene las tasas de crecimiento más altas. Nótese que el PKO aumentó más lentamente que el APC, lo que es un signo de almendras más pequeñas en los frutos de la palma de aceite con el paso del tiempo.

El aceite de soja creció a una tasa promedio de 4,4 %. Sin embargo, caerá a 2,4 % durante la próxima década, si la trituration de soja crece a la par con el aumento de la demanda de torta. Recientemente, los aceites de canola y girasol han tenido un crecimiento rápido, pero son cultivados en rotaciones, y el alcance para una expansión rápida adicional es considerado como limitado.

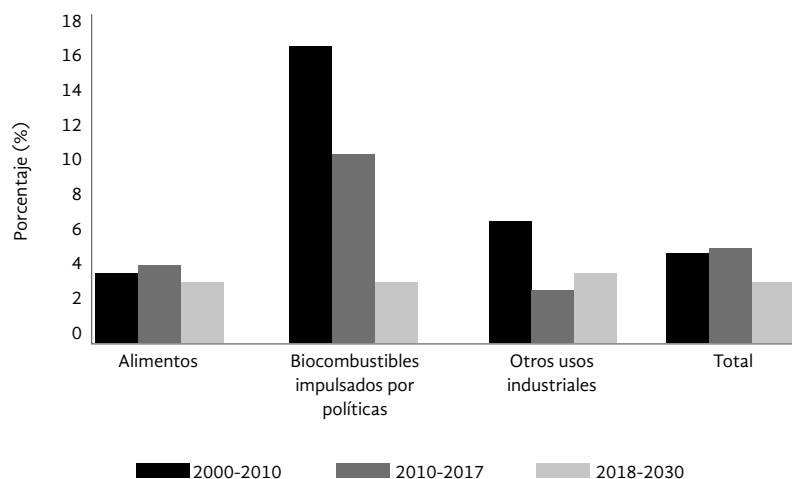
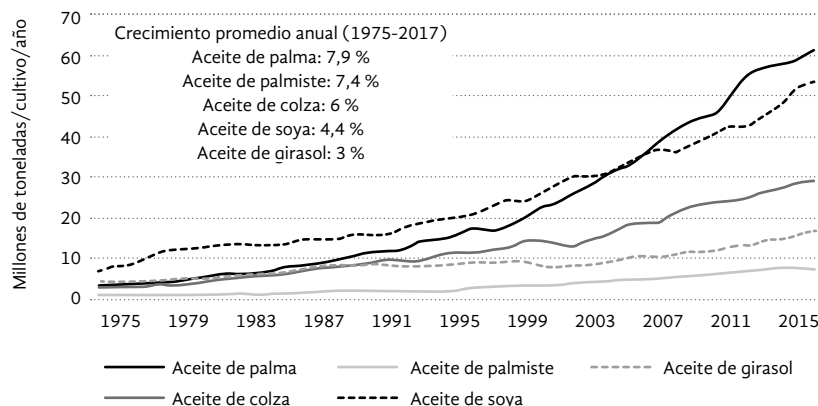


Figura 3. Crecimiento futuro de la demanda de biocombustibles.

Figura 4. Crecimiento en la producción de los principales aceites.



Aunque, actualmente, la palma de aceite es cómodamente la fuente principal de aceites vegetales del mundo, puede cumplir esta función desde el área cosechada más pequeña de los cuatro cultivos principales (Figura 5). La soja, a pesar de tener un área cosechada seis veces mayor que la palma de aceite, produce 25 % menos aceite total que esta, considerando los aceites de palma y de palmiste en conjunto. La canola, con casi el doble de área, produce poco más del 40 % del volumen total de aceite suministra-

do por la palma de aceite. Por último, los cultivos de girasol, con un área mayor, producen apenas el 25 % del aceite suministrado por la palma de aceite.

Por su parte, la Figura 6 muestra la tasa de crecimiento interanual del área total plantada con palma de aceite en Indonesia, la cual tiene la tendencia subyacente en la tasa de crecimiento superpuesta. A partir de la información en esta figura, se pueden sacar dos conclusiones principales: i) es absolutamente claro que la tasa de crecimiento en áreas cultivadas

Figura 5. Crecimiento del área sembrada con cultivos oleaginosos a nivel mundial.

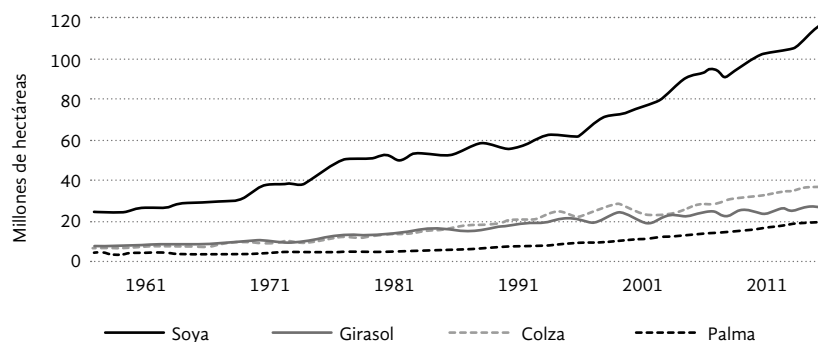
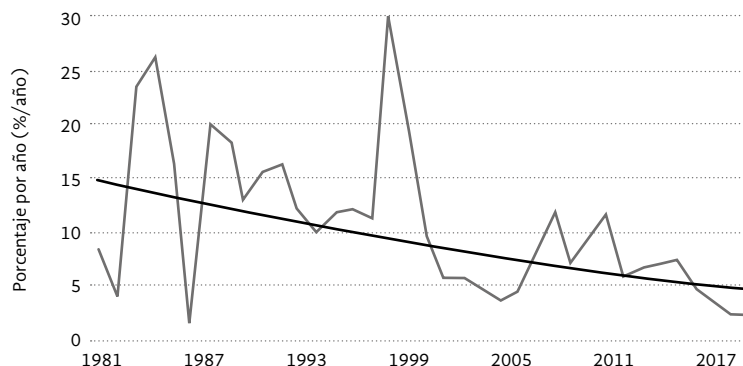


Figura 6. Tasa de crecimiento del área sembrada con palma de aceite en Indonesia.



está bajando; y ii) en los últimos tres años la tasa de crecimiento ha estado bastante por debajo de la tendencia a largo plazo.

Con el anuncio de una moratoria aún más estricta sobre las nuevas plantaciones de palma de aceite, es muy poco probable que haya una aceleración en las plantaciones de Indonesia para satisfacer el crecimiento en la demanda mundial de aceite.

Las conclusiones de la Figura 7 para Malasia son similares a las de Indonesia, siendo muy claro que la tasa de crecimiento del área sembrada está disminuyendo, ubicándose en los últimos dos años muy por debajo de la tendencia a largo plazo. Adicionalmente, y de forma similar a Indonesia, hay fuertes presiones externas para limitar cualquier expansión en el área de palma de aceite. Por ende, se puede concluir que es muy poco probable que haya una recuperación en el ritmo de las plantaciones de palma de aceite en

Malasia, que pueda ayudar a satisfacer el crecimiento proyectado de la demanda mundial de aceite.

Colombia ha alcanzado un lugar notable debido a que es el principal productor de APC en Latinoamérica, siendo probablemente la región que tome el liderazgo en nuevas plantaciones a medida que el Sudeste Asiático desacelera dramáticamente, según lo mostrado en las Figuras 6 y 7. Sin embargo, nuevamente las conclusiones son muy similares a las de Indonesia y Malasia: i) es claro que la tasa de crecimiento del área sembrada está disminuyendo; y ii) aunque los datos oficiales mostrados en la Figura 8 implican que las nuevas áreas de palma de aceite subieron en 2017, no se espera que esta sea una tendencia de largo plazo. Por ende, se puede concluir que es poco probable que las plantaciones de palma de aceite en Colombia puedan satisfacer el crecimiento en la demanda mundial de aceite.

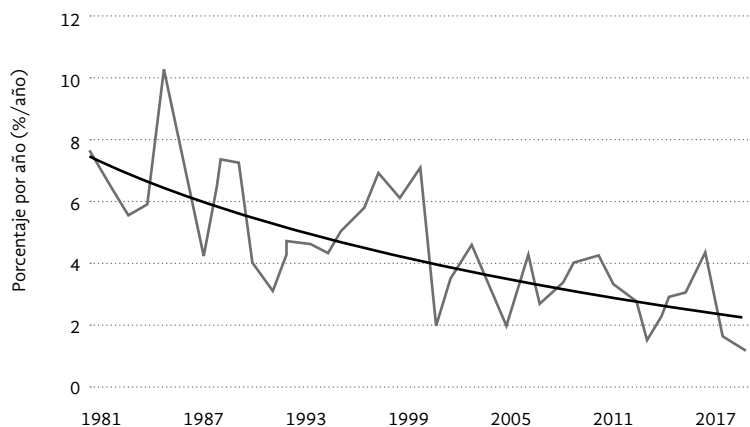


Figura 7. Tasa de crecimiento del área sembrada con palma de aceite en Malasia

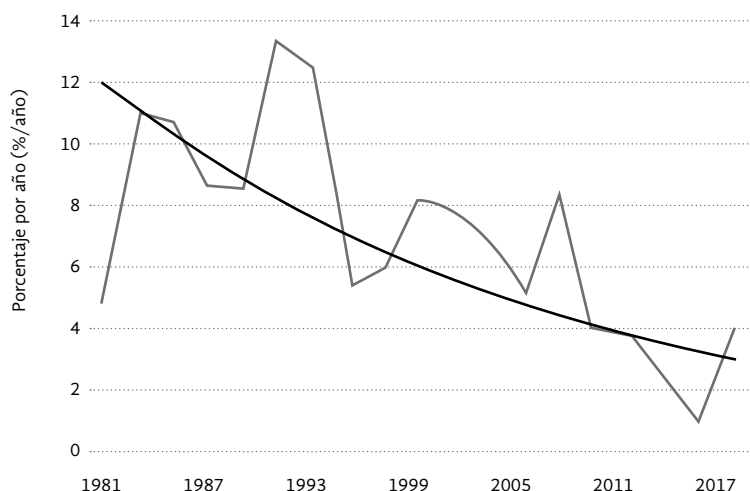


Figura 8. Tasa de crecimiento del área sembrada con palma de aceite en Colombia.

Tendencias en el rendimiento de los principales cultivos, resaltando la diferencia entre la palma de aceite y las semillas oleaginosas anuales

La Figura 9 compara el crecimiento en el rendimiento por hectárea cosechada de soya en todo el mundo (los rendimientos mostrados son en toneladas de frijoles de soya, no de aceite), canola (toneladas de semillas), aceite de palma de Indonesia y Malasia combinado (toneladas de APC) y aceite de palma de Colombia (toneladas de APC). Sobre el asunto, es de mencionar que el desempeño de la palma de aceite es decepcionante en comparación con los dos principales cultivos de semillas oleaginosas.

En la Figura 10 se muestra el comportamiento promedio anual en el rendimiento por hectárea cosechada, durante las últimas dos décadas 1998-2008 y 2008-2017. El aumento en los rendimientos tanto de soya como de canola es evidente. A primera vista,

el pobre desempeño de los rendimientos de palma de aceite en el Sudeste Asiático después de 2008 se podría explicar en una desaceleración tras el fuerte crecimiento registrado en el periodo 1998-2008, o por el impacto del fenómeno El Niño y la crisis financiera que afectó a esta región durante dicho periodo.

El impacto de una desaceleración brusca o incluso un alto en las plantaciones de palma de aceite

La Figura 11 compara lo que se podría llamar “el desarrollo normal de la actividad” con el efecto de un alto total en nuevas plantaciones, para ilustrar qué pasaría con una “moratoria mundial” para la palma de aceite. Bajo “el desarrollo normal de la actividad”, se asume que la demanda sigue las tendencias pasadas y que los rendimientos y áreas de los diferentes cultivos también lo hacen. Las áreas de soya crecerían en 62 millones de hectáreas (más de 50 %) en el pe-

Figura 9. Crecimiento en el rendimiento (ha/año) de algunos productores de aceites.

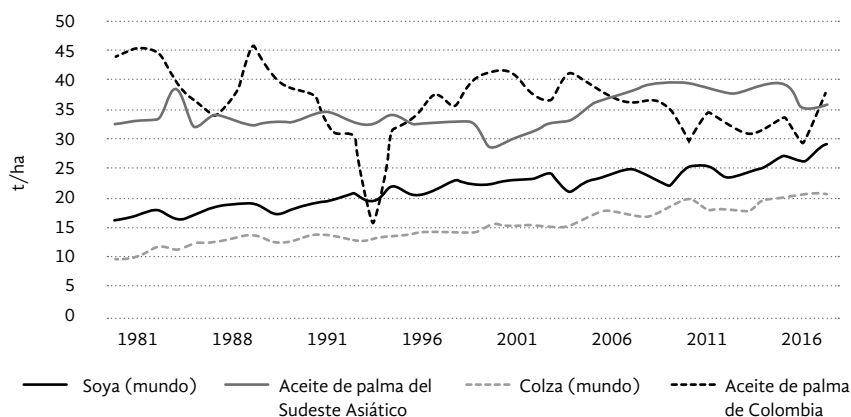
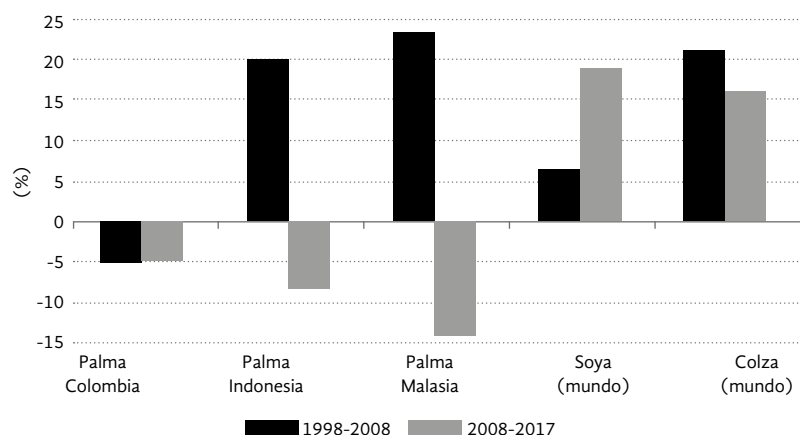


Figura 10. Comportamiento promedio anual en el rendimiento por hectárea de algunos productores mundiales.



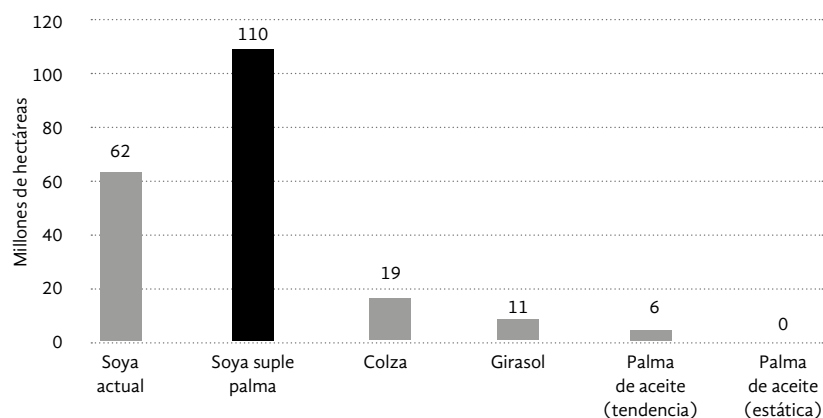


Figura 11. Crecimiento de área en tendencia vs. no más palma de aceite.

riodo 2015-2040, la canola en 19 millones, el girasol en 11 y la palma de aceite en 6.

Con una “moratoria mundial”, el área de palma es estática. La canola y el girasol se cultivan en rotaciones, solamente un año cada cuatro. Entonces, la soya es el único cultivo que puede llenar la brecha dejada por un alto en las áreas de palma de manera realista. Esto requeriría 110 millones de hectáreas adicionales de soya para el 2040. Al respecto, habría que considerar el impacto probable de prácticamente doblar su área de esta manera.

Actualmente, la soya representa más de la mitad del área total cultivable en Argentina. Sin embargo, el crecimiento en las áreas de soya parece haberse estancado, lo que hace que sea poco probable que Argentina esté en una buena posición para plantar los muchos millones de hectáreas más de soya que se necesitarían, para proporcionar el aceite que no sería producido por la palma de aceite bajo la “moratoria mundial”; de hecho, los agricultores de soya en Argentina han expandido sus plantaciones de esta forma, a pesar de que se les paga apenas dos tercios del precio en el resto del mundo, como resultado de los altos impuestos a la exportación fijados sobre el complejo de soya durante muchos años.

Al igual que en Argentina (y lo mismo aplica para Bolivia y Paraguay), la soya ocupa más de la mitad del área total cultivable en Brasil. En la práctica, este cultivo juega un papel aún más importante en la agricultura

brasileña que lo que podría sugerir una simple comparación entre áreas de cultivos. Más de un tercio del área total de soya es de cultivo doble, es decir, inmediatamente después de cosecharla, se planta maíz safrinha.

Las implicaciones de la desaceleración en los precios mundiales de los aceites vegetales

¡Bienvenidos a la “ley de las consecuencias no previstas”!

Aquellos que intentan detener el crecimiento en las áreas de palma de aceite mediante una “moratoria mundial”, se enfrentarán a la ley de las consecuencias no previstas, mediante presiones en las áreas de cultivo de soya. Frente a este escenario, vale la pena preguntarse: ¿Dónde se plantarán los 110 millones de hectáreas adicionales de soya (de 118 millones en 2015), sin consecuencias ambientales desastrosas para Suramérica? ¿Hay consciencia de que esta campaña en contra de la siembra de palma de aceite genera un impulso masivo a los suministros de soya que distorsionará los precios?

La soya genera más de cuatro toneladas de torta por cada tonelada de aceite. Reemplazar el aceite de palma “perdido” creará mucho excedente de torta, afectando sus precios. Sin embargo, a pesar de los precios más bajos de la torta, el valor de los frijoles tendrá que subir para que se siembre y se produzca

más aceite de soya. Por lo tanto, el precio del aceite de soya debe aumentar más de cuatro veces la caída del precio de la torta, para compensar el efecto de los menores precios sobre el valor de los frijoles. Un ejemplo simple (y, resalto, conservador) ilustra el dilema creado por una “moratoria mundial a la palma de aceite”. Supongamos que, para persuadir a los agricultores de soya a que siembren otros 110 millones de hectáreas, su precio debe aumentar en USD 20 por tonelada (50c/bu, 6 % hoy), y que el suministro extra de torta reduce el precio en USD 40 por tonelada (13 % de hoy).

Para mantener el margen de trituración, el precio del aceite debe subir \$ 250 por tonelada. En otras palabras, un aumento de tan solo USD 20 (6 %) en los

precios del frijol y una caída de \$ 40 (13 %) en los precios de la torta, necesita un incremento de USD 250 (40 % de hoy) en el valor del aceite para mantener los márgenes de trituración. De hecho, el crecimiento en los precios del aceite de soya (que, inevitablemente, pasaría al APC a medida que los usuarios cambian de aceite) sería mayor casi que con seguridad.

El mundo tiene que decidir entre dos alternativas y resultados muy diferentes: i) detener la siembra de palma de aceite y ver un daño ambiental considerable en Suramérica a medida que se siembra un área más grande de soya, resultando en precios del APC mucho mayores; o ii) permitir la expansión de las áreas de palma de aceite de una forma ambientalmente sostenible en América Latina.



MÓDULO 1

Manejo del cultivo de la palma de
aceite y su mejoramiento genético

Ganoderma*: progresos en investigación, manejo y retos a futuro

Ganoderma: Research Advances, Management and Future Challenges

AUTORES: Shamala Sundram, Idris Abu Seman, Nur Diyana Roslan, Lee Pei Lee Angel, Intan Nur Ainni Mohamed Azni, Salwa Abdullah Sirajuddin.

CITACIÓN: Sundram, S., Seman, I. A., Roslan, N. D., Angel, L. P. L., Mohamed-Azni, I. N. A., & Sirajuddin, S. A. (2019). *Ganoderma*: progresos en investigación, manejo y retos a futuro. *Palmas*, 40 (Especial Tomo I), 57-69.

PALABRAS CLAVE: palma de aceite, *Ganoderma*, Pudrición basal del estípite, manejo, retos.

KEYWORDS: Oil palm, *Ganoderma*, basal stem rot, control, challenges.

*Artículo original recibido en inglés y traducido por Carlos Arenas París.



SHAMALA SUNDARAM

Junta de Aceite de Palma de Malasia
Malaysian Palm Oil Board (MPOB)

Resumen

La palma de aceite, el cultivo que se extiende por la región del cinturón ecuatorial, no está exenta de pestes y enfermedades. Este cultivo es altamente susceptible a una serie de enfermedades limitadas a la región donde se planta. La Pudrición basal del estípite es causada por *Ganoderma* spp., la amenaza número uno en la región del Sudeste Asiático. Históricamente, era percibida como una enfermedad senescente, pero pronto se descubrió que su prevalencia no tiene correlación con la edad de la palma. Además de los factores predisponentes que incluyen parámetros bióticos y abióticos, se planteó la hipótesis de que los materiales de siembra anteriores, el tipo de suelo, el estado de los nutrientes y las técnicas de replantación contribuían a su propagación. De todos estos factores, la técnica de replantación juega un papel fundamental para controlarla, pero no es suficiente. Resulta prioritario un Sistema de Manejo Integrado de Plagas (MIP), con un subconjunto de MIP denominado Manejo Integral de *Ganoderma* (MIG). El MIG es un conjunto de estrategias que intenta controlar de manera integral la enfermedad dentro de un umbral económico. Este enfoque es una combinación de prácticas culturales, control

biológico y aplicación de químicos. Los montículos y fosos de tierra, que antes se pensaba no eran efectivos, actualmente son activamente utilizados en el campo como un último recurso para prolongar la vida útil de la palma productiva. En la búsqueda para lograr el estado de cultivo sostenible, la aplicación de controles biológicos es el camino a seguir en el manejo eficaz de la enfermedad. A continuación, discutiremos progresos recientes en los agentes, principalmente *Trichoderma*, *Micorriza arbuscular* (MA), *Hendersonia*, *Hymenomycotina*, *Actinomycetales* y bacterias endófitas. Se prevé que la detección de un material resistente/tolerante es la medida más efectiva en contra de esta enfermedad mortal. La búsqueda de estos se lleva a cabo activamente mediante la revisión de materiales mejorados avanzados. Futuras tecnologías de edición genética podrían proporcionar a los mejoradores mayor flexibilidad para introducir rasgos beneficiosos en el genoma.

Abstract

Oil palm, the crop that spreads across the region of equatorial belt is no exception to pest and diseases. The crop is highly susceptible to a number of diseases confined to the region it is planted. Basal stem rot caused by *Ganoderma* spp. is the number one threat to its cultivation in the South East Asia region. Historically, the disease was once perceived as a senescence disease but soon discovered that the prevalence to have no correlation to the age of palm. Predisposing factors that include biotic and abiotic parameters: previous planting materials, soil type, nutrient status, replanting techniques were hypothesized to have contributed to the disease spread. However, among these factors, replanting technique plays a key role in keeping this disease at bay. However, identifying a single predisposing factor is insufficient to manage the disease. On this respect, an integrated Pest Management System (IPM) is the priority in controlling the pest and disease with a subset of IPM referred as Integrated *Ganoderma* Management (IGM). IGM is an assembly of management strategies that holistically attempts to control the disease at an economic threshold. The approach is a combination of cultural practices, biological control and chemical application. Soil mounding and trenches that were once thought not effective is now being actively carried out in the field as a final resort to prolong the lifespan of the standing productive palm. In the pursuit of achieving the status of a sustainable crop, biological control application is the way forward in managing the disease effectively. Recent advances on these microbes namely *Trichoderma*, *Arbuscular mycorrhiza* (AM), *Hendersonia*, *Hymenomycetes*, *Actinomycetes* and endophytic bacteria will be discussed in this paper. It is envisaged that screening for resistant/tolerant material against the disease would be the most effective measure against this deadly disease. Screening for resistant materials are actively being carried out using mass screening of advance breeding materials. On this note, future gene editing technologies would be able to provide breeders with more flexibility to introduce beneficial traits into the genome.

□

Introducción

Historia de la taxonomía de *Ganoderma*

En 1881, el género *Ganoderma* fue presentado por el micólogo finlandés Petter Adolf Karsten y *Polyporus lucidus* fue la única especie que él incluyó en el género. El micólogo francés Narcisse Théophile Patouillard describió varias especies nuevas de *Ganoderma*, con base en la característica única de basidióspora de

doble membrana, y transfirió los nombres de otros géneros de políporos durante 40 años a partir de 1887. En 1889, Patouillard publicó una monografía que resultó en la distinción de 48 especies con esporas esféricas o subesféricas en la sección *Amauroderma*. Entonces, en 1905, la sección *Amauroderma* de *Ganoderma* fue elevada al rango de género por William Murill. Marinus Donk propuso la subfamilia *Ganodermatoideae*, que fue la primera en unir el taxón de la gran familia *Polyporaceae*. El taxón se actualizó al

rango de familia con la introducción de *Ganoderma-taceae*. El nombre ordinal *Ganodermatales* fue introducido y aceptado por David Pegler en la octava edición del diccionario de los fungus (Seo y Kirk, 2000).

Pudrición basal del estípite por *Ganoderma*

La PBE es la enfermedad más prevalente en las plantaciones de palma de aceite en el Sudeste Asiático, causada por *Ganoderma*. Fue descrita por primera vez en la República del Congo, África Occidental, en 1915 (Wakefield, 1920) y detectada por Thompson (1931) en Malasia, en palmas de aceite con más de 25 años de edad. La infección atacó palmas viejas que se debían replantar. Con el paso de los años y la replantación entrando a la cuarta generación, las incidencias aumentaron y comenzó a afectar a palmas más jóvenes, de entre 10 y 15 años de edad (Turner, 1981). Recientemente se reportó que *Ganoderma* estaba infectando palmas de aceite tan jóvenes como de entre 12 y 24 meses de plantadas. Esto se debió a la falta de técnicas de saneamiento que causaron una infección rápida, dada la abrumadora presión del inóculo en el suelo. La palma de aceite, particularmente en áreas replantadas (Singh, 1991) o en zonas con cubierta sembrada en palma de coco (Ariffin *et al.*, 1996), tuvieron una alta incidencia de *Ganoderma* en aquellas con cuatro y cinco años de edad. La manifestación de PBE es más prevalente en áreas maduras de palma de aceite en Malasia, donde puede destruir 80 % del cultivo cuando está en la mitad de su vida económica útil (Turner y Gillbanks, 2003). Un estudio realizado por Idris (2003) investigó la especie responsable del PBE, en el que examinó 267 aislados obtenidos en un amplio análisis de 37 plantaciones ubicadas en todas las regiones de Malasia. Encontró al menos tres especies involucradas: *G. boninense*, *G. zonatum* y *G. miniatocinctum*. Todos los aislados de *G. boninense* y *G. zonatum* resultaron patogénicos, pero este último era significativamente menos agresivo; mientras que *G. tornatum* solo se encontró en palmas muertas y presuntamente saprófitas.

Factores predisponentes

Los factores predisponentes fueron otro aspecto etiológico que inicialmente se presumió como la

causa principal de la enfermedad. Estos incluyen información sobre plantaciones anteriores, tipo de suelo, estado de nutrientes, técnicas de replantación y la edad de las palmas. De estos, el único que aparentemente contribuye a la prevalencia de la enfermedad es la técnica de replantación. Investigaciones recientes que utilizan diferentes sustratos de biomasa de palma de aceite tales como el pecíolo, el raquis y las raíces, encontraron que las últimas tenían la mayor tasa de supervivencia en el campo. El sustrato es capaz de sobrevivir durante más de 16 semanas. El estudio también fue comparado con bloques de madera de caucho (RWB, por su sigla en inglés) y encontró que la supervivencia de RBW superaba las 24 semanas (Gunashila *et al.*, 2017). Por lo tanto, la remoción de biomasa continúa siendo uno de los criterios más importantes para limitar el potencial del inóculo en el campo y reducir la prevalencia de la enfermedad.

Turner (1981) descubrió que las plantaciones anteriores juegan un papel importante en la propagación de la PBE. El estudio encontró que a los cinco años de edad, las palmas de aceite que fueron plantadas en lugar de palmas de coco, habían sido diagnosticadas con síntomas severos de la enfermedad. Esto fue diferente para plantaciones anteriores de caucho, que mostraron una incidencia muy baja y se esperaba que esta atacara únicamente cuando las palmas fueran mayores (Turner, 1981). Sin embargo, el escenario es completamente diferente porque la plantación anterior, el tipo de suelo y el estado de nutrientes no afectan la prevalencia de la enfermedad. El manejo de esta, con un enfoque y estrategia integral de sanidad apropiada, logró retrasarla de manera significativa. Recientemente, el Malaysian Palm Oil Board (MPOB) publicó una serie de procedimientos operativos estándar (SOP, por su sigla en inglés) para el control de *Ganoderma* en palma de aceite. Los SOP fueron publicados en 2016 y describen casi todo lo que un cultivador debe saber sobre la identificación, detección y control de la PBE por *Ganoderma*. Hay varios componentes para su manejo, incluyendo prácticas de cultivo, de control biológico y químico. En el campo se aplican estrategias apropiadas según la severidad de la enfermedad antes, durante y después de la replantación. Al darse cuenta de esto, MPOB introdujo el Manejo Integral de *Ganoderma* (MIG)

a la industria, en forma de pautas sobre cómo tratar palmas recién plantadas, replantadas e infectadas en el campo. A continuación se resume cada práctica de control y sus avances recientes.

Manejo de la enfermedad mediante prácticas de cultivo

Esta técnica es el primer componente del MIG. MPOB ha integrado varios enfoques para controlar y manejar la *Ganoderma* en el campo. Las estrategias fueron desarrolladas para minimizar la incidencia de la enfermedad en el área de replantación, prolongar la vida productiva de las palmas y retrasar la infección con *Ganoderma*. Incluyen controles biológicos, químicos y de cultivo. Sin embargo, esta investigación ha tenido muy poco progreso. Si no se llevan a cabo las prácticas recomendadas durante la replantación, se producirán infecciones graves que pueden aparecer tan pronto como a los 12 meses en el campo.

Programa de censo de PBE

Uno de los aspectos más importantes del control es un estudio integral de la PBE, que debe realizarse en una plantación con un historial conocido de infección. Es obligatorio hacer un censo del terreno dentro del año anterior a la replantación, con el fin de identificar las palmas infectadas. Estas se etiquetan y amarran con cinta, y sus coordenadas se anotan en el sistema de posicionamiento global (GPS) para su referencia futura. El censo de terreno suministra información importante sobre el estado de las palmas infectadas, que son evaluadas con base en el índice de gravedad de enfermedad (DSI, por su sigla en

inglés), en palmas maduras e inmaduras. El paso a seguir es decidir la estrategia adecuada.

Prácticas de cultivo

Las estrategias de control están principalmente enfocadas en la eliminación del inóculo de *Ganoderma* que está colonizando y sobreviviendo en el suelo, siendo la fuente para las palmas recién plantadas. Por lo tanto, con el fin de controlar la presión del inóculo, es necesario remover y tratar las infectadas. En el caso de palmas maduras se han creado varias técnicas para mantener y prolongar su vida productiva.

i) Montículos de tierra: el MPOB ha sugerido implementarlos con tratamientos orgánicos, inorgánicos y químicos a las palmas enfermas, con el fin de mantener su productividad entre 10 y 15 años. Este método aumenta el crecimiento de las raíces de la palma de aceite para mejorar la absorción de nutrientes. Incluye la remoción del tejido enfermo mediante cirugía, o la aplicación de tratamientos químicos alrededor y sobre este.

ii) Saneamiento: significa destruir y eliminar la presencia del inóculo de *Ganoderma* en las palmas infectadas. Este procedimiento se realiza removiendo los rodales de palmas de aceite enfermas que portan masas de micelio de *Ganoderma*, para evitar una mayor transmisión de la enfermedad antes de la replantación. También deben realizarse en las palmas existentes que muestren síntomas de infección. Se hizo una prueba de campo para investigar la efectividad de dicho procedimiento en el control de *Ganoderma* después de la replantación. Se evaluaron los síntomas de PBE en intervalos de seis meses, uno, dos y tres años después de la plan-

tación, y en intervalos de un año durante los siguientes. Después de 15 años de plantadas, los resultados mostraron una incidencia promedio de 39,4 % de PBE en el área sin saneamiento, y de tan solo el 8,5 % en donde se implementó. Con base en esta prueba, el procedimiento logró reducir la PBE en un 30,9 %.

iii) Las zanjas son otra opción, pero es menos popular entre los

Uno de los aspectos más importantes del control es un estudio integral de la PBE, que debe realizarse en una plantación con un historial conocido de infección.

cultivadores debido a su costo y efecto insignificante sobre la palma afectada. El procedimiento implica la remoción de tierra alrededor de la palma a una profundidad de 60 cm, formando un cuadrado a aproximadamente un m del tronco. Se considera que las zanjas evitan el contacto raíz a raíz, que también es uno de los principales factores de propagación de la enfermedad en el campo. Las zanjas afectan la aplicación de fertilizantes y dificultan la cosecha de los frutos.

El MPOB recomienda, de manera especial, seguir los procedimientos de sanidad para tratar las áreas con incidencia de PBE, incluyendo la tala de palmas viejas, seguido de la excavación del tronco, muñón y raíces y, finalmente, arar una nueva hilera de siembra. También sugiere que el nuevo hoyo para plantar esté lejos del antiguo.

Manejo de la enfermedad con agentes de control biológico

El agente de control biológico (ACB) tiene la mayoría de avances de investigación en el manejo de *Ganoderma*. MPOB ha comercializado varios productos que están disponibles en el mercado actualmente. Estos tienen hongos, bacterias o actinomicetos como el microorganismo efectivo (ME). El ACB se define como el uso de un cultivo único o mixto de organismos para controlar los fitopatógenos, y permitir la restauración de algunos de los factores reguladores que limitan la capacidad competitiva de los patógenos (Chet & Inbar, 1994).

En la agricultura sostenible se recomienda emplear una fuente natural para desarrollar actividad en contra de patógenos dañinos para la planta, y reemplazar los pesticidas químicos, perjudiciales para el medioambiente (Sadoma *et al.*, 2011). Para ser un ACB exitoso, este debe cumplir con el requisito de varios modos de acción antagonistas, incluyendo microparasitismo, capacidad de liberar compuestos antifúngicos, enzimas líticas, potencial para competir por nutrientes con otros patógenos, resistencia inducida, promover el crecimiento de la planta para amortiguar los ambientes hostiles (Pal & Gardener, 2006). Comercialmente, estos ACB fueron desarrollados como biofungicidas para el control de diferentes en-

fermedades patógenas y su aplicación es considerada como un tratamiento preventivo, ya que no tiene la capacidad de curar infecciones preexistentes. Se puede mejorar su efectividad con su aplicación en plantas infectadas en etapas tempranas. Recientemente, la PBE es el centro del uso de ACB que incluye varios microorganismos que han sido estudiados por su actividad antagonista de *Ganoderma*.

Hongos como agente de control biológico de *Ganoderma*

Algunas especies de *Trichoderma* son uno de los agentes más poderosos debido a su capacidad para producir compuestos antifúngicos, microparasitismo, competencia por nutrientes y la producción de enzimas que degradan la membrana celular para la defensa contra diferentes tipos de patógenos de plantas (Harman *et al.*, 2004; Sundram, 2013; Angel *et al.*, 2016). El *Trichoderma* en el control de *G. boninense* ha sido estudiado exhaustivamente *in vitro* e *in vivo* (Sundram e Idris, 2008; Sundram, 2013; Angel *et al.*, 2016, 2017). La evaluación en vivero y en campo realizada por Sundram *et al.* (2016) mostró que las cepas de *Trichoderma* son un biofertilizante apropiado para el manejo de la enfermedad en el cultivo de palma de aceite. La Micorriza arbuscular-vesicular (MAV) es otro hongo beneficioso en la agricultura sostenible, ya que tiene la capacidad de reducir el daño causado por los patógenos de plantas, promover el crecimiento de la planta, y es rentable y amigable con el medioambiente (Sundram *et al.*, 2015; Dar y Reshi, 2017). Estudios prueban un aumento en la tolerancia del anfitrión a ataques de patógenos después de la inoculación con MAV, reduciendo el desarrollo de la enfermedad (Sundram *et al.*, 2015). Sundram *et al.* (2011) y Sundram *et al.* (2015) evidencian la capacidad de MAV como un ACB para la defensa en contra de *G. boninense*. La aplicación de tanto *Glomus intraradices* y *G. clarum* redujo significativamente el desarrollo de la enfermedad de Pudrición basal del estípite y promovió el crecimiento de la palma de aceite tanto en pruebas de vivero como de campo (Sundram *et al.*, 2015).

Uso de microbios

Otros microbios que se utilizan como ACB son los actinomicetos debido a su facultad para producir

compuestos antifúngicos, antibióticos, enzimas, y porque también tienen factores para el crecimiento de plantas. Varios estudios han mostrado su capacidad como un antagonista fúngico con potencial de colonizar las raíces (Cao *et al.*, 2004; Shariffah-Muzaimah *et al.*, 2015). Se aisló *Streptomyces nigrogriseolus* GanoSA1 del suelo y se encontró que era altamente antagonista de *Ganoderma* en un estudio *in vitro* e *in vivo* (Shariffah-Muzaimah *et al.*, 2015, 2017). Posteriormente, estos actinomicetos fueron desarrollados en un producto comercial conocido como actinoPLUS. Las pruebas de campo determinaron que, después de 36 meses de tratamiento, solo se observó un 6,6 % de palmas muertas debido a infección por *Ganoderma* (Idris *et al.*, 2016). Se encontró que *Hendersonia*, un hongo endofítico aislado de los tejidos de la raíz, era un potencial ACB en contra de *Ganoderma* (Nurrashyeda *et al.*, 2011). Kamarudin *et al.* (2017) también evidenciaron, que una colonización exitosa de *Hendersonia* en las plántulas de la palma de aceite resultó en una regulación positiva de los genes de biosíntesis de tiamina, lo que puede haber contribuido a mantener un crecimiento y función óptima de la planta. *Hendersonia* fue desarrollado en un producto comercial como un biofertilizante llamado GanoEF, que ha sido utilizado por los cultivadores para prevenir y controlar la *Ganoderma*, con pruebas de campo mostrando únicamente 5,0 % de palmas muertas 36 meses después de las pruebas (Nurrashyeda *et al.*, 2011; Idris *et al.*, 2016). La regulación de la enfermedad utilizando basidiomicetos es uno de los enfoques más recientes, especialmente en el periodo de replantación. Se evaluaron las propiedades de control biológico de varios tipos de estos y se encontró que *Pycnoporus sanguineus*, *Trametes lactinea* y *Lentinus tigrinus* eran potenciales biodegradadores con una buena capacidad de supresión de la enfermedad en pruebas de vivero. Los basidiomicetos candidatos serán explorados en el campo para acelerar la biodegradación de la biomasa de la palma de aceite y para crear competencia con *G. boninense* para reducir los potenciales de inóculo.

Uso de bacterias como agente de control

También se ha estudiado el uso de bacterias debido a su capacidad antagonista de patógenos. La de las

endofíticas para colonizar el tejido anfitrión, es una ventaja adicional para mejorar aún más el desempeño de un cultivo. Se han analizado bacterias endofíticas como *Burkholderia* spp., *Bacillus* spp., *Serratia* spp. y *Pseudomonas* spp., encontrando que estas tienen la facultad de controlar la actividad de *Ganoderma* (Sapak *et al.*, 2008; Azadeh *et al.*, 2010; Maizatul *et al.*, 2012; Bivi *et al.*, 2010; Sundram *et al.*, 2015). Por otro lado, las bacterias endofíticas son uniformes en todo el contexto y residen principalmente en los sistemas vasculares adyacentes a los vasos del floema y el xilema. Esta característica es ideal, ya que les permite inhibir la penetración de *Ganoderma* en el desarrollo del sistema vascular de la planta (Bivi *et al.*, 2010). Sundram *et al.* (2015) demostraron que la incorporación de Micorriza junto con *P. aeruginosa* endofítica mejoró significativamente la eficacia del control biológico tanto en pruebas de vivero como de campo. *Burkholderia* aislado de la palma de aceite muestra la capacidad de controlar *Ganoderma* en pruebas *in vitro* y en vivero (Maizatul e Idris, 2009) y, posteriormente, fue desarrollado en una fórmula como polvo *Burkholderia* GanodEB2 (Maizatul *et al.*, 2012).

Control químico

El progreso de la investigación en el control químico es limitado. Palmas maduras que mostraban síntomas tempranos de infección por *Ganoderma* fueron sometidas a varios tratamientos químicos para mantener su ciclo económico productivo. MPOB ha estado ejerciendo y creando conciencia en el uso del fungicida hexaconazol y el fumigante dazomet para evitar o reducir el efecto epidémico de *Ganoderma* en el campo.

- i) Fungicida hexaconazol: la aplicación de fungicida para el control de enfermedades ha demostrado ser efectiva en varios cultivos, incluyendo el de papa (Drenth y Sendall, 2004), cacao (Drenth & Sendall, 2004), durio (Lim, 1990; Hien *et al.*, 2004), caucho (Lim and Lee, 1990) y cultivos de cereales (Poole y Arnaudin, 2014). Se inyectó el fungicida hexaconazol (4,5 g de ingrediente activo) disuelto en siete litros de agua en una lesión en progreso del micelio fúngico utilizando un aparato de inyección a presión (AIP), a aproximadamente 15 kg cm⁻². Las palmas infectadas con síntomas iniciales

de *Ganoderma* lograron protegerse y prolongar su ciclo de vida productivo.

- ii) Fumigante dazomet: el tratamiento del muñón con este fumigante puede ser aplicado en áreas donde no es posible cortar el tronco. Ha sido ampliamente utilizado para ayudar a reducir las incidencias de enfermedades y mejorar la vida útil de varios cultivos. Se ha comprobado que su uso en suelos erradica varios patógenos en árboles de pomo y drupa (Mai & Abawi, 1981), pino (Filip & Roth, 1977) y setas (Vishwakarma *et al.*, 2015). Los fumigantes de suelo metilisotiocianato (MITC) han demostrado suprimir efectivamente los patógenos de basidiomicetos en las raíces (HaiXia *et al.*, 2010). Dazomet libera MITC a medida que se descompone en el suelo al entrar en contacto con el agua. Las pruebas de campo revelaron que dazomet puede reducir efectivamente la cantidad de inóculos de *Ganoderma* con una sola aplicación de 485 g i.a. por muñón.

Detección de *Ganoderma boninense* en palma de aceite

La detección de la enfermedad de PBE causada por *Ganoderma boninense* es un desafío debido al hecho de que los síntomas externos solo aparecen/son visibles en las etapas críticas. Los métodos establecidos de detección que se utilizan actualmente incluyen pruebas bioquímicas, análisis molecular y agricultura de precisión (detección de campo y emergente). A continuación se presentan los que han sido desarrollados por MPOB.

Análisis bioquímico/detección cultural

- i) Medio selectivo de *Ganoderma* (MSG): es uno de los métodos para la detección más temprana de tejidos infectados con *Ganoderma*. Contiene un fungicida y antibióticos que evitan el desarrollo de bacterias y otros hongos (Ariffin & Idris, 1992) e induce la formación de un halo

La detección de la enfermedad PBE causada por *Ganoderma boninense* es un desafío debido al hecho de que los síntomas externos solo aparecen visibles en las etapas críticas. Los métodos establecidos incluyen pruebas bioquímicas, análisis molecular y agricultura de precisión.

marrón alrededor de la colonia. Sin embargo, no es concluyente ya que otros basidiomicetos también pueden crecer en este medio. Usualmente, este método es compatible con una identificación molecular de seguimiento.

- ii) Inmunoensayo: los métodos inmunológicos mediante la manipulación de anticuerpos han sido ampliamente utilizados en la detección de bacterias, virus, hongos en las raíces, en el suelo y en los materiales de la palma. El uso de anticuerpos monoclonales y policlonales en técnicas inmunoquímicas, tales como el ensayo inmunoabsorbente ligado a enzimas (ELISA), ofrece una mayor simplicidad y un diagnóstico rápido. Este método también ha sido reportado en la detección de *Ganoderma* spp. El ensayo utilizando ELISA-Pab mostró una mejor detección en comparación con el MSG (método basado en el cultivo), mediante la validación de reacciones cruzadas con hongos saprófitos (Madihah *et al.*, 2014).

Análisis de compuestos orgánicos volátiles (COV)

Los patrones de descubrimiento y compuestos orgánicos volátiles (COV) específicos, asociados con la infección de *Ganoderma* utilizando la CG-EM, pueden servir como clave para la detección temprana de la PBE. Se identificaron tres COV producidos por *Ganoderma* patógeno (2-furano-carboxaldehído, 5- (hidroxilmetil)-, tiofeno, 2-propilo y 4H-piran-4-ona) de raíces infectadas y se seleccionaron biomarcadores potenciales (Nusaibah *et al.*, 2013). Actualmente, los

COV de micelios del cuerpo fructífero de *Ganoderma* son evaluados y perfilados con el fin de complementar el estudio para identificar biomarcadores potenciales.

Análisis molecular y detección

- i) Multiplex PCR (MPCR): es una prueba cualitativa *in vitro* con una mayor sensibilidad que utiliza la tecnología de oligonucleótido de doble especificidad (DPO). Esta técnica permite la detección temprana de las cuatro especies de *Ganoderma* en la palma de aceite mediante una única reacción en tubo (Idris *et al.*, 2010).
- ii) Amplificación isotérmica mediada por bucle (LAMP: actualmente se está desarrollando la detección de *Ganoderma* mediante LAMP. Se seleccionaron unos pocos genes de apareamiento, reguladores y nuevos de *G. boninense*. De ocho conjuntos de iniciadores LAMP utilizados, solo una combinación puede diferenciar las cepas patógenas de *Ganoderma* (*G. boninense*, *G. zonatum* y *G. miniatocinctum*) contra las no patógenas (*G. tornatum* y otros hongos de ascomicetos/basidiomicetos) (Madihah *et al.*, 2018).

Agricultura de precisión (detección en campo y emergente)

- i) Tomografías: se desarrolló la tomografía GanoSken para ubicar e identificar la infección, y un sistema de información geográfica para detectar el sitio y distribución posible de infecciones de *Ganoderma* en plantaciones (Idris *et al.*, 2010). Su gran ventaja es que tiene la capacidad de hacerlo en palmas de aceite que parecen sanas.
- ii) Espectroscopia de campo: consiste en un sensor de espectrorradiómetro, calibración de reflectancia blanca, cable de fibra óptica y un *software* de procesamiento de datos conocido como Sistema de Análisis Espectral de Palma de Aceite (OPSAS por su sigla en inglés). La técnica de espectroscopia de campo se refiere a la aplicación de un espectrorradiómetro de mano para recuperar reflectancias espectrales del dosel y de las hojas de la palma de aceite. De esta manera se identificaron longitudes de onda apropiadas para la

detección de *Ganoderma* en la palma de aceite (Izzuddin *et al.*, 2013, 2017b).

- iii) Vehículo aéreo no tripulado (VANT) multi-espectral: examina el desempeño de imágenes rojo-verde-azul (RVA) y de infrarrojo cercano (NIR) de un VANT, para la detección aérea de *Ganoderma* en la palma de aceite (Izzuddin *et al.*, 2017a). Sin embargo, la precisión no logra un buen estándar de clasificación de más del 80 %, según lo sugerido por varios investigadores.
- iv) Constante dieléctrica (CD) y mediciones del contenido de clorofila: la técnica de la espectroscopia dieléctrica es similar a la de infrarrojo y fluorescencia en términos de rapidez y no invasibilidad, y opera con base en las propiedades eléctricas de un producto como función de la frecuencia. Esta investiga el potencial de CD y las propiedades de clorofila en la detección de la PBE en palmas de aceite. Los resultados demostraron que la CD y el contenido de clorofila en ciertos niveles puede ser utilizado como un parámetro de detección de la enfermedad por *Ganoderma* (Alfadhil *et al.*, 2018).

Epidemiología

Los hallazgos de Idris (2003) en la identificación de los patógenos causales de la PBE ameritan una nueva investigación. Al momento del estudio, la investigación taxonómica se enfocó en las características morfológicas. Sin embargo, con la evolución de la biotecnología, en la actualidad la taxonomía es fuertemente apoyada por la caracterización molecular. Con el progreso en las herramientas de biotecnología, la actualización de la sistemática del género que causa la PBE, es el siguiente paso para cerrar la brecha de conocimiento sobre este patógeno. Dicha actualización juega un papel fundamental en la epidemiología del patógeno de la colección de *Ganoderma*, mediante la identificación de características morfotaxonómicas intrínsecas, la capacidad de patogenicidad y las técnicas moleculares y bioquímicas.

Por lo tanto, se inició la recolección con el muestreo de cuerpos fructíferos del patógeno en todo el país, incluyendo Sabah y Sarawak. A la fecha, se ha completado un total de 20 puntos de muestra de diferentes ubicaciones geográficas en Malasia, y la colección se está

acercando a los 500 aislados. La gran recopilación de datos sobre las características fenotípicas y genotípicas del patógeno llevó al desarrollo de un portal. Este servirá como herramienta de información sobre el patógeno con las características fenotípicas y genotípicas del hongo de podredumbre blanca (Figura 1). La colección se llama Base de Datos de Información de *Ganoderma* (GANOID), y se generó a partir de la recolección de cultivos de sus especies en campos de palma de aceite de todo el país. El portal funciona como una plataforma centralizada que almacena, organiza, interrelaciona, actualiza y recupera información de los aislados dentro y fuera de MPOB de manera eficiente. Este portal también es el primero de Malasia que presenta una colección, secuencias de ADN e información morfológica sobre las especies para la industria y el resto del público.

Con la implementación de tecnología de punta como el análisis de big data de inteligencia artificial, el portal podría servir como base para el establecimiento futuro de un modelo de predicción de enfermedades a gran escala, basado en datos geográficos para mejorar la prevención temprana de estas en la palma de aceite.

Manejo a largo plazo: detección de resistencia

La detección de la resistencia es la mejor manera para controlar la enfermedad como un enfoque a largo plazo. Socfin anunció la identificación de un material resistente a través de su programa de evaluación de 10 años, conocido como “Material Tahan *Ganoderma*” o MTG, disponible comercialmente. MPOB también inició la investigación y, actualmente lo hace a más de 50 líneas de reproducción. Esto requiere una estrecha coordinación entre el grupo de patología y reproducción, y se espera que la evaluación sea uno de los programas más importantes bajo las prioridades de investigación. Para lograrlo, se utilizan técnicas de germinación de semillas en vez de técnicas de espera, y requiere menos intervalos de tiempo para la infección. El índice de severidad de enfermedad (DSI) convencional no aplica con la técnica de germinación de semillas; por el contrario, los síntomas positivos y la infección del estípite determinan la resistencia de una línea de reproducción.

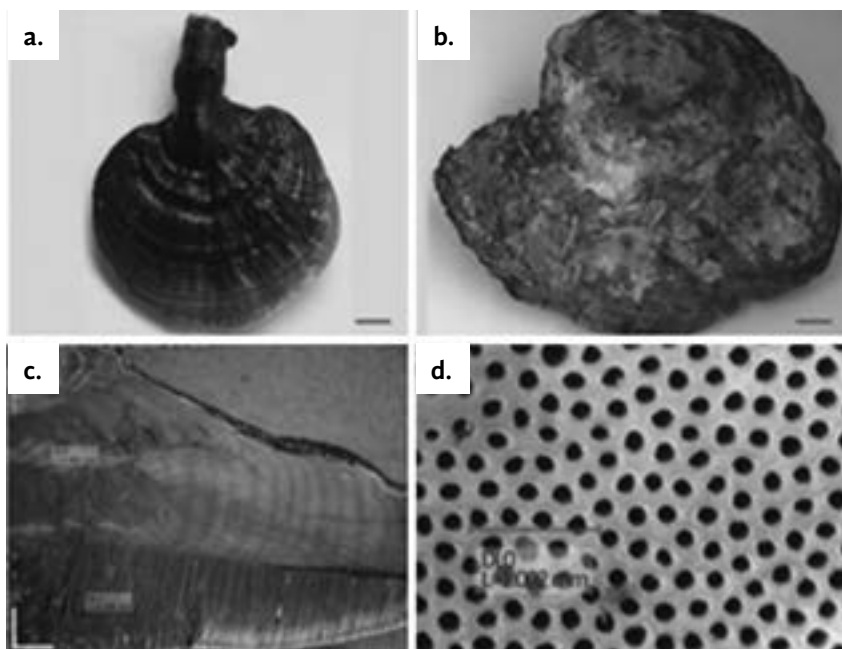


Figura 1. Características y visualización microscópica de cuerpo fructífero de *Ganoderma*. (A) Lacado y marrón rojizo; (B) No lacado y marrón claro en la superficie; (C) Himenio y contexto de la corteza; (D) tamaño del poro en el cuerpo fructífero (a barra de escala roja).

Desafíos a futuro

La enfermedad ha aumentado respecto a las últimas décadas. Inicialmente, se pensó que los factores pre-disponentes eran los factores abióticos que contribuían a la propagación, pero el escenario presente encontró que solo las técnicas de replantación son las más relevantes para su manejo. No obstante, el cambio climático generará incertidumbre en la producción de palma de aceite en todo el mundo, dado que el calentamiento global aumentará el rango y la gravedad de las enfermedades dentro de los próximos 20 años. Un informe reciente de Paterson *et al.* (2015) resalta el impacto del cambio climático en la productividad, así como en los problemas de propagación y desarrollo. Este trabajo también concluyó que hay una “ventana de oportunidad” de aproximadamente 30 años para hacer frente a los posibles niveles futuros de la enfermedad si se toman acciones correctivas en estos momentos.

Varios problemas sin resolver también incluyen el método de propagación, que no se ha establecido definitivamente, pero que es casi seguro que sea por esporas en el aire. La investigación por la función de estas debe ser abordada con un trabajo más colaborativo y publicar artículos científicos. La podredumbre blanca es el modo de acción definitivo del hongo y debe ser estudiada en relación con la gravedad de la enfermedad en la palma de aceite.

Otros retos también incluyen la evolución de la especie *Ganoderma* en una cepa más virulenta. Con cambios en los factores climáticos y medioambientales, existe una alta posibilidad de encontrar cepas más patógenas en el futuro. Una apreciación de esto llevará a métodos óptimos para controlar las pérdidas de palma de aceite, especialmente respecto a la detección continua de resistencia, con un programa de detección que actualice las cepas de prueba respecto a su virulencia.

Referencias

- Alfadhl, Y. K., Samsuzana, A. A., Siti, K. B., Nazmi, M. N., Idris, A. S., & Izzuddin, M. A. (2018). Dielectric constant and chlorophyll content measurements for basal stem rot (BSR) disease detection. En *2018 International Conference on Signals and Systems (ICSigSys)*, Bali, 2018, pp. 69-72.
- Angel, L. P. L., Sundram, S., Tay, B. Y. P., Yusof, M. T., & Ismail, I. S. (2017). Profiling of anti-fungal activity of *Trichoderma virens* 159c involved in biocontrol assay of *Ganoderma boninense*. *Journal Oil Palm Research*, 30, 83-93.
- Angel, L. P. L., Yusof, M. T., Ismail, I. S., Tay, B. Y. P., Mohamed-Azni, I. N., Kamarudin, N. H., & Sundram, S. (2016). An *in vitro* study of the antifungal activity of *Trichoderma virens* 7b and a profile of its non-polar antifungal components released against *Ganoderma boninense*. *Journal of Microbiology*, 54, 732-744.
- Ariffin, D., & Idris, A. S. (1992). The *Ganoderma* Selective Medium (GSM). Kuala Lumpur, Malaysia: Palm Oil Research Institute.
- Ariffin, D., Idris, A. S., & Marzuki, A. (1996). Spread of *Ganoderma boninense* and vegetative compatibility studies of a single field palm isolates. En *Proceedings PORIM International Palm Oil Congress*. Palm Oil Research Institute of Malaysia, Bangi.
- Azadeh, B. F. Sariah, M., & Wong, M. Y. (2010). Characterization of *Burkholderia cepacia* genomovar I as a potential biocontrol agent of *Ganoderma boninense* in oil palm. *African Journal of Biotechnology*, 24, 3542-3548.

- Bivi, M. R., Siti-Noor, M., Khairulmazmi, A., & Idris, A. S. (2010). Control of *Ganoderma boninense*: A causal agent of basal stem rot disease in oil palm with endophyte bacteria *in vitro*. *International Journal of Agriculture and Biology*, 12, 833-839.
- Cao, L., Qiu, Z., Dai, X., Tan, H., Lin, Y., & Zhou, S. (2004). Isolation of endophytic actinomycetes from roots and leaves of banana (*Musa acuminata*) plants and their activity against *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 20, 501-504
- Chet, I., & Inbar, J. (1994). Biological control of fungal pathogens. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 48, 37-43.
- Dar, M. H., & Reshi, Z. A. (2017). Vesicular Arbuscular Mycorrhizal (VAM) fungi- as a major biocontrol agent in modern sustainable agriculture system. *Russian Agricultural Sciences*, 43, 138-143.
- Drenth, A., & Sendall, B. (2004). Economic Impact of *Phytophthora* Diseases in Southeast Asia. In D. Andre & I. G. David (Ed.). *Diversity and Management of Phytophthora in Southeast Asia* (pp. 10-29). Canberra: ACIAR Monograph 114.
- Drenth, A., Guest, D. I., Minh-Chau, N., Sangchote, S., Vawdrey, L., & Diczbalis, Y. (2004). Integrated Management of *Phytophthora* Diseases of Durian: Recommendations and Benefit–Cost Analysis. In D. Andre & I. G. David (Ed.). *Diversity and Management of Phytophthora in Southeast Asia* (pp. 222-226). Canberra: ACIAR Monograph 114.
- Filip, G. M., & Roth, L. F. (1977). Stump injections with soil fumigants to eradicate *Armillariella mellea* from young-growth ponderosa pine killed by root rot. *Canadian Journal of Forest Research*, 7(2), 226-231.
- HaiXia, Q., Tao, L., YueJin, W., Yun, H., FanHua, Z., & SiQin, L. (2010). Study on fumigation with methyl isothiocyanate against common bunt (*Tilletia tritici*) of wheat. *Plant Quarantine*, 24(5), 5-8.
- Harman, G. E., Howell, C. R., Viterbo, A., Chet, I., & Lorito, M. (2004). *Trichoderma* species--opportunistic, avirulent plant symbionts. *Nature Reviews Microbiology*, 2, 43-56.
- Idris, A. S., Mazliham, M. S., Loonis, P., & Basri, M. W. (2010). GanoSken for early detection of *Ganoderma* infection in oil palm. MPOB Information Series No. 499.
- Idris, A. S., Nurrashyeda, R., Mohd-Hefni, R., Shamala, S., & Norman, K. (2016). *Standard operating procedures (SOP) guidelines for managing Ganoderma disease in oil palm*. Kuala Lumpur: MPOB.
- Idris, A. S., Rajinder, S., Madihah, A. Z., & Basri, M. W. (2010). *Multiplex PCR-DNA kit for early detection and identification of Ganoderma species in oil palm*. MPOB Information Series No. 531.
- Idris, A. S., Yamaoka, M., Hayakawa, S., Basri M. W., Noorhasimah, I., & Ariffin, D. (2003). *PCR technique for detection of Ganoderma*. MPOB Information Series No. 202.
- Izzuddin, M. A., Ezzati, B., Nisfariza, M. N., Idris, A. S., & Alias, S. A. (2017a). *Analysis of red, green, blue (RGB) and near infrared (NIR) images from unmanned aerial vehicle (UAV) for detection of Ganoderma disease in oil palm*. *PIPOC 2017, KLCC KL*.
- Izzuddin, M. A., Idris, A. S., Nisfariza, M. N., Nor-Diana, A. A., Helmi, Z. M., & Ezzati, B. (2017b). The development of spectral indices for early detection of *Ganoderma* disease in oil palm seedling. *International Journal of Remote Sensing*, 38(23), 6505-6527.
- Izzuddin, M. A., Idris, A. S., Wahid, O., Nisfariza, M. N., & Helmi, Z. M. (2013). *Field spectroscopy for detection of Ganoderma disease in oil palm*. MPOB Information Series No. 532.

- Kamarudin, A. N., Idris, A. S., & Yusof, Z. N. A. (2017). Thiamine biosynthesis gene expression analysis in *Elaeis guineensis* during interactions with *Hendersonia toruloidea*. *Journal of Oil Palm Research*, 29, 218-226.
- Lim, T. K. (1990). *Durian diseases and disorders*. Kuala Lumpur: Tropical Press Sdn Bhd.
- Lim, T. K., & Lee, B. S. (1990). Control of *Phytophthora* on four temperate and tropical tree crops by trunk injection with phosphorous acid. En 3rd. *International Conference on Plant Protection in the Tropics*, Kuala Lumpur, Malaysia.
- Madihah, A. Z., Idris, A. S., & Rafidah, A. R. (2014). Polyclonal antibodies of *Ganoderma boninense* isolated from Malaysian oil palm for detection of basal stem rot disease. *African Journal of Biotechnology*, 13(34), 3455-3463.
- Madihah, A. Z., Idris, A. S., Kamaruddin, S., Bharudin, I., Bakar, F. D. A., & Murad, A. M. A. (2018). Detection of *Ganoderma*, causal of basal stem rot (BSR) disease to oil palm using Loop-mediated isothermal amplification (LAMP). *The 15th Symposium of Malaysian Society of Applied Biology*, Malacca.
- Mai, W. F., & Abawi, G. S. (1981). Controlling replant diseases of pome and stone fruits in Northeastern United States by preplant fumigation. *Plant Disease*, 859-864.
- Maizatul, S. M., & Idris, A. S. (2009). Nursery evaluation of *Agrobacterium radiobacter*, *Burkholderia cepacia* and *Pseudomonas syringae* to control *Ganoderma boninense* infection in oil palm. *PIPOC International Palm Oil Congress, Agriculture, Biotechnology and Sustainability*.
- Maizatul, S. M., Idris, A. S., Madihah, A. Z., Nasyaruddin, M. N. M., & Kushairi, A. (2012). Burkholderia GanoEB2 powder as biological control of *Ganoderma* in oil palm. MPOB TT No. 507.
- Nurrashyeda, R., Idris, A. S., Madihah, A. Z., Ramle, M., & Kushairi, A. (2011). *Hendersonia GanoEF1 granules for the control of Ganoderma boninense in oil palm*. MPOB TT No. 483.
- Nusaibah, S. A., Idris, A. S., Siti-Nor-Akmar, A., & Sariah, M. (2013). *Determination of Ganoderma volatile organic compounds in oil palm*. MPOB Information Series No. 642.
- Pal, K., & Gardener, B. M. (2006). Biological control of plant pathogens. *The Plant Health Instructor*, 1-25.
- Paterson, R. R. M., Kumar, L., Taylor, S., & Lima, N. (2015). Future climate effects on suitability for growth of oil palms in Malaysia and Indonesia. *Scientific Reports*, 5, 14457.
- Poole, N. F., & Arnaudin, M. E. (2014). The role of fungicides for effective disease management in cereal crops. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 36(1), 1-11.
- Sadoma, M. T., El-Sayed, A. B. B., & El-Moghazy, S. M. (2011). Biological control of downy mildew disease of maize caused by *Peronosclerospora sorghi* using certain biocontrol agents alone or in combination. *Journal of Agriculture Research Kafer El-Sheikh University*, 37, 1-11.
- Sapak, Z., Meon, S., & Ahmad, Z. A. M. (2008). Effect of endophytic bacteria on growth and suppression of *Ganoderma* infection in oil palm. *International Journal of Agriculture Biology*, 10, 127-132.
- Seo, G. S., & Kirk, P. M. (2000). *Ganodermataceae: nomenclature and classification*. In: Flood J, Bridge PD, Holderness M, eds. *Ganoderma Diseases of Perennial Crops*. Wallingford, UK: CABI Publishing, 3-22.

- Shariffah-Muzaimah, S. A., Idris, A. S., Madihah, A. Z., Dzolkhifli, O., Kamaruzzaman, S., and Cheong, P. C. H. (2015). Isolation of actinomycetes from rhizosphere of oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) for antagonism against *Ganoderma boninense*. *Journal Oil Palm Research*, 27, 19-29.
- Shariffah-Muzaimah, S. A., Idris, A. S., Madihah, A. Z., Dzolkhifli, O., Kamaruzzaman, S., & Maizatul-Suriza, M. (2017). Characterization of *Streptomyces* spp. isolated from the rhizosphere of oil palm and evaluation of their ability to suppress basal stem rot disease in oil palm seedlings when applied as powder formulations in a glasshouse trial. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 34, 15.
- Singh, G. (1991). *Ganoderma* - The scourge of oil palms in the coastal areas. In: Ariffin D, Sukaimi J. (Ed). *Proceedings of Ganoderma Workshop, Bangi, Selangor, Malaysia*. Kuala Lumpur, Malaysia: Palm Oil Research Institute of Malaysia, 81-97.
- Sundram, S. (2013). First report: Isolation of Endophytic *Trichoderma* from Oil Palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) and their *in vitro* antagonistic assessment on *Ganoderma boninense*. *Journal Oil Palm Research*, 25, 368-372.
- Sundram, S., & Idris, A. S. (2008). *Trichoderma* as a Biocontrol agent against *Ganoderma* in oil palm. MPOB TT No. 422.
- Sundram, S., Angel, L. P. L., Tay, B. Y. P., Roslan, N. D., Mohamed Azni, I. N. A., & Idris, A. S. (2016). *Trichoderma virens*, an effective biocontrol agent against *Ganoderma boninense*. MPOB TT No. 587.
- Sundram, S., Meon, S., Idris, A. S., & Othman, R. (2015). Application of arbuscular mycorrhizal fungi with *Pseudomonas aeruginosa* UPMP3 reduces the development of *Ganoderma* basal stem rot disease in oil palm seedlings. *Mycorrhiza*, 25, 387-397.
- Sundram, S., Meon, S., Idris, A. S., & Othman, R. (2011). Symbiotic interaction of endophytic bacteria with arbuscular mycorrhizal fungi and its antagonistic effect on *Ganoderma boninense*. *Journal of Microbiology*, 49, 551-557.
- Thompson, A. (1931). *Stem-rot of the oil palm in Malaya*. Bulletin, Department of Agriculture. Straits Settlements & F.M.S., Science Series, 6.
- Turner, P. D. (1981). *Oil palm diseases and disorders*. Oxford University Press. Kuala Lumpur Malaysia.
- Turner P. D., & Gillbanks, R. A. (2003). *Oil palm cultivation and management*. Kuala Lumpur: The Incorporated Society of Planters.
- Vishwakarma, P., Pandey, A. K., Mishra, P., Singh, P., & Tripathi, N. N. (2015). Enhancement of Shelf Life of Button Mushroom, *Agaricus bisporus* (Higher Basidiomycetes) by Fumigant Application of *Lippia alba* Essential Oil. *International Journal of Medicinal Mushrooms*, 17(1), 87-92.
- Wakefield, E .M. (1920). Diseases of the oil palm in West Africa. *Kew Bulletin*, 306-308.

La enfermedad de manchas foliares por *Pestalotiopsis* en la palma de aceite endémica del Sudeste Asiático*

Oil Palm Leaf Spot as Endemic Disease in Southeast Asia



TASREN MAHAMOOTH

Investigador Principal en Agroecología
Avanzada, Malasia. Advanced
Agricultural Research Sdn.

AUTORES: Tasren Mahamooth, Tan Swee Sian, N. A. Omar, N. F. Jumri, Gog You Ken, Patrick Ng.

CITACIÓN: Mahamooth, T., Sian, T. S., Omar, N. A., Jumri, N. F., Ken, G. Y., & Ng, P. 2019). La enfermedad de manchas foliares por *Pestalotiopsis* en la palma de aceite endémica del Sudeste Asiático. *Palmas*, 40 (Especial Tomo I), 70-76.

PALABRAS CLAVE: manchas foliares, *Pestalotiopsis*, palma de aceite, Sudeste Asiático.

KEYWORDS: Leaf spots, *Pestalotiopsis*, oil palm, Southeast Asia.

*Artículo original recibido en inglés y traducido por Carlos Arenas París.

Resumen

La enfermedad de la mancha foliar *Pestalotiopsis* ha sido previamente reportada en América Latina. Si bien existen informes que asocian la enfermedad con un solo patógeno (*P. palmarum*), algunos estudios reportaron que la enfermedad se atribuía a un complejo fungoso que reunía *P. palmarum*, *P. glandicula*, *Colletotrichum*, *Curvularia*, *Gloesporium* y *Helminthosporium*. En Colombia, la infección puede producir defoliación del dosel y en casos graves puede propagarse al dosel superior. En estas condiciones severas, se informó que las reducciones del rendimiento iban de 30 a 5 toneladas de RFF/ha/año en un lapso de 4 años y que la propagación de la enfermedad se atribuía a vectores de insectos Lepidópteros, mientras que el Hemíptero (*Leptopharsa gibbicularina*) también se asoció como vector de la enfermedad. En la última década, hemos observado una creciente incidencia de las enfermedades de mancha foliar, no solo dentro de los límites de Malasia, sino en todo el Sudeste Asiático.

En la provincia china de Hainan, se informó que las palmas de dos años estaban seriamente infectadas con síntomas de la enfermedad de la mancha foliar que producían necrosis de los folíolos y desecación prematura del pecíolo. El patógeno fue identificado como *Pestalotiopsis microspora*. En Tailandia se reportaron síntomas similares en la palma de aceite y el patógeno fue identificado como *Pestalotiopsis theae*. Para este trabajo se recolectaron folíolos de palma de aceite que mostraban manchas necróticas similares a los de los dos últimos informes en diferentes plantaciones de Malasia, al igual que en la Isla de Belitung, en Indonesia. En todos los casos, la intensidad de la enfermedad de la mancha foliar aumentaba en los pecíolos más viejos y en unos pocos casos observamos que la enfermedad infectaba el dosel superior, lo que difiere de los trastornos producidos por la enfermedad en Latinoamérica.

Abstract

Pestalotiopsis leaf spot disease, considered a minor disease, was previously reported in Latin America. While there are reports that associate the disease to a single pathogen (*P. palmarum*), some studies reported that the disease was attributed to a fungal complex involving *P. palmarum*, *P. glandicula*, *Colletotrichum*, *Curvularia*, *Gloeosporium* and *Helminthosporium*. In Colombia, infection can cause defoliation of the canopy and in severe cases can spread to the upper canopy. Under such severe conditions, yield reductions from 30 to 5 tons FFB/ha/yr over a 4-year period were reported and the disease spread was attributed to Lepidoptera insect vectors while Hemiptera (*Leptopharsa gibbicularina*) was also associated as a vector for the disease. In the last decade, we have observed increasing incidences of leaf spot diseases not only within Malaysia but across Southeast Asia as well. In China's Hainan Province, two-year-old palms were reported as heavily infected with leaf spot disease symptoms, which resulted in pinnae necrosis and premature frond desiccation. The pathogen was identified as *Pestalotiopsis microspora*. In Thailand, similar symptoms were reported on oil palm with the pathogen identified as *Pestalotiopsis theae*. In our study, oil palm pinnae samples exhibiting necrotic spots similar to the latter two reports were collected from different states across Malaysia as well as Belitung Island, Indonesia. In all cases, the intensity of leaf spot disease increased with older fronds and only in rare cases did we observe the disease to infect the upper canopy, thus differing from the Latin American disease condition.

Introducción

Las manchas foliares por *Pestalotiopsis*, considerada una enfermedad menor de la palma de aceite, fue reportada anteriormente en Latinoamérica. La incidencia de esta enfermedad parece estar asociada con brotes de insectos lepidópteros (Martínez & Plata-Rueda, 2013), mientras que se ha reportado que *Leptopharsa gibbicularina* es un vector para la enfermedad (Aldana et al., 2009). En Colombia, la infección puede causar la defoliación del dosel y, en casos extremos, expandirse al dosel superior. Bajo estas condiciones severas, se han reportado reducciones en el rendimiento del cultivo de hasta 25 toneladas de RFF/ha/año en un perio-

do de cuatro años, según lo estudiado por Martínez & Plata-Rueda (2013). Si bien hay varias investigaciones que relacionan la enfermedad con un único patógeno *P. Palmarum* (reportado por primera vez por Labarca et al., 2006), también ha sido atribuida a un complejo de hongos que involucra *P. palmarum*, *P. glandicula*, *Colletotrichum*, *Curvularia*, *Gloeosporium* y *Helminthosporium* (Escalante et al., 2010).

No es sorpresa que el Sudeste Asiático, siendo una de las tres principales regiones productoras, albergue una enfermedad similar que infecta las palmas de aceite plantadas en el campo. En la última década,

hemos observado un aumento en las incidencias de manchas foliares, no solo en Malasia, sino también a lo largo del Sudeste Asiático. En la provincia china de Hainan, al este de Asia, se informó que palmas de dos años de edad estaban altamente infectadas con síntomas de la enfermedad, lo que resultó en la necrosis de la fronda y llevó a su desecación prematura. El patógeno fue identificado como *Pestalotiopsis microspora* (Shen *et al.*, 2014). En Tailandia se reportaron síntomas similares en la palma de aceite, con *Pestalotiopsis theae* (Suwannarach *et al.*, 2013). En nuestro estudio, recolectamos muestras de hojas de palma de aceite de varios estados de Malasia y de la Isla de Belitung en Indonesia, que mostraban manchas necróticas similares a las de las dos últimas investigaciones (Suwannarach *et al.*, 2013; Shen *et al.*, 2014), con el fin de identificar el patógeno.

Materiales y métodos

Recolección de aislados

Se tomaron muestras de la hoja número 17 en palmas de aceite infectadas naturalmente, de entre 10 y 12 años de edad, a lo largo de Malasia peninsular. Todos los hongos fueron cultivados en agar de papa y dextrosa (APD) a 28 °C. Cuando fue posible, se derivaron cultivos de esporas individuales de cada aislado y se almacenaron a -80 °C (mantenimiento del cultivo a largo plazo) o a 20 °C en agua destilada estéril.

Identificación

Los aislados fueron agrupados inicialmente como *Pestalotiopsis* o como otros hongos con base en su caracterización morfológica y, posteriormente, identificados utilizando técnicas moleculares. Se extrajo el ADN total del micelio obtenido de 107 cultivos de *Pestalotiopsis* en APD por entre cinco y siete días a 28 °C con un kit de aislamiento de ADN Mo Bio PowerPlant® Pro, siguiendo las instrucciones del fabricante. Se realizó la amplificación PCR de las regiones ITS1, ITS2 y 5.8S de ADNr, junto con los genes de β -tubulin (TUB) parcial y los del factor de elongación de traducción parcial 1-alfa (TEF), según lo descrito por Maharachchikumbura *et al.* (2014). La identificación taxonómica de *Pes-*

talotiopsis se basó en el análisis filogenético utilizando los conjuntos de datos combinados (ITS, TUB y TEF), junto con las secuencias de referencia de GenBank, citadas en el estudio mencionado anteriormente. Para otros hongos, es estudio se basó únicamente en sus regiones ITS1, ITS2 y 5.8S ADNr.

Pruebas de patogenicidad

Se realizaron pruebas de patogenicidad con base en dos enfoques: en folíolos inmaduros desprendidos (ensayo de disco foliar) y en palmas de vivero de tres meses de edad. El primero se hizo para determinar la existencia de diferencias notables entre los aislados del mismo taxón de *Pestalotiopsis*. El segundo, para confirmar la patogenicidad de diferentes especies evaluada con base en inoculantes individuales o en conjunto con otros hongos. Para el primer enfoque, se sumergieron las hojas en una solución de lejía al 5 % (v/v) durante un minuto; se enjuagaron en agua destilada estéril (ADE) y se secaron con papel secante antes de colocarlas en agar-agua (0,8 % p/v de agar bacteriológico). Previo a inocularlas con un tapón de micelio en agar de 5 mm que contenía esporas, se ocasionaron ligeras heridas en las hojas a analizar. Las hojas inoculadas se cultivaron durante siete días a 28 °C. Para el segundo enfoque, se inocularon palmas saludables con una suspensión de esporas. Antes de esto, las plántulas germinadas se plantaron en arena lavada con ácido y esterilizada por calor, y se cultivaron durante tres meses, suministradas con riego regular, fertilización, iluminación (fotoperiodo de 16:8) y sin fungicidas. Las palmas fueron transferidas a cámaras húmedas de plástico (seis por cámara) y se dejaron aclimatar durante dos semanas más. La temperatura del aire ambiente y la humedad relativa al interior de las cámaras húmedas se mantuvo a 26 ± 2 °C y a $60 \pm 2,5$ %, respectivamente. La inoculación se realizó con suspensiones de esporas recién preparadas (10 ml x 10⁸ esporas/ml por cámara), aplicadas con un rociador de mano. Se recogieron de cultivos de dos semanas, con aproximadamente 5ml 0,05 % (v/v) de Tween 80 (polisorbato) (por placa de Petri), y fueron filtradas con lana de vidrio entre dos y tres veces para eliminar cualquier resto notable de agar. Se determinó la cuenta de esporas con un hemocitómetro y se ajustó

el volumen a aproximadamente 108 esporas/ml con una solución de Tween 80 al 0,05 % (v/v).

Después de la inoculación, las plantas fueron sometidas condiciones de oscuridad durante 48 horas y, posteriormente, a un fotoperiodo de 16:8, monitoreando los síntomas durante cuatro semanas. El aislamiento del inoculante se realizó según lo descrito anteriormente y se confirmó mediante técnicas moleculares.

Resultados y discusión

La enfermedad de manchas foliares que afecta los cultivos de palma de aceite en Malasia ha sido des-

crita de forma similar en Tailandia (Suwannarach *et al.*, 2013) y en China (Shen *et al.*, 2014), pero se ha atribuido a dos especies diferentes de *Pestalotiopsis*. Con base en nuestro estudio, los síntomas descritos en estas investigaciones parecen ser similares a los observados en Malasia (Figura 1). A partir del análisis, el aislamiento y la identificación taxonómica revelaron que se aisló una serie de diferentes especies de hongos ascomicetos de los tejidos enfermos, aunque consistentemente en todas las muestras. Además, se obtuvieron diferentes *Pestalotiopsis* spp. (Tabla 1).

Nuestros hallazgos se correlacionan con varios informes de que el género *Pestalotiopsis* no es es-

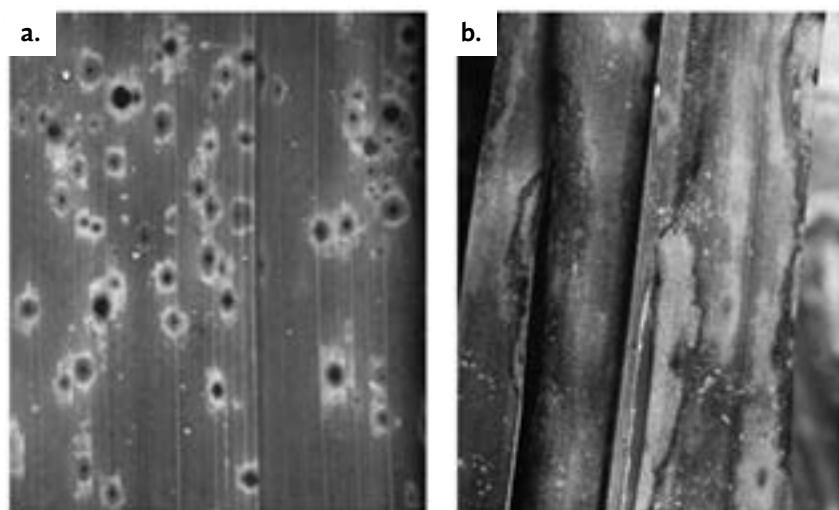


Figura 1. Síntomas comunes de enfermedad de manchas foliares observadas en el campo: [a] manchas circulares translúcidas y elípticas de color naranja con centro hundido de color marrón en el centro de la lesión. El halo de color naranja a amarillo solo es evidente contra una fuente de luz, de lo contrario parece como una mancha de color naranja oscuro; [b] bajo condiciones severas, las manchas localizadas se unen y llevan a lesiones necróticas que eventualmente mueren y se vuelven secas y quebradizas.

Tabla 1. Resumen de taxones de *Pestalotiopsis* asignados con base en un enfoque filogenético multilocus con genes ITS1, ITS2, 5.8S ADNr TUB y TEF. Regiones de Malasia peninsular: I sur, II central y III norte.

| Especie | Región de la muestra | No. de aislados (este estudio) |
|------------------------------------|----------------------|--------------------------------|
| <i>Pestalotiopsis theae</i> | I-III | 36 |
| <i>Pestalotiopsis crassiuscula</i> | Belitung, Indonesia | 5 |
| <i>Pestalotiopsis olivacea</i> | II | 4 |
| <i>Pestalotiopsis clavispora</i> | I, II | 9 |
| <i>Pestalotiopsis zonata</i> | II, III | 3 |
| <i>Pestalotiopsis microspora</i> | I-III | 18 |
| <i>Pestalotiopsis virgulata</i> | I-III | 7 |
| <i>Pestalotiopsis neglecta</i> | I-III | 15 |
| <i>Pestalotiopsis versicolor</i> | I, III | 10 |

pecífico del hospedador, debido a que se han aislado diferentes especies del mismo (Keith *et al.*, 2005; Maharachchikumbura *et al.*, 2011). La presencia de diversos taxones de *Pestalotiopsis* también complicó el diagnóstico del patógeno, dado que el género *Pestalotiopsis* igualmente puede existir como un endófito (Watanabe *et al.*, 2010; Maharachchikumbura *et al.*, 2011). Tras haber obtenido más de cien aislados en este estudio, las pruebas de patogenicidad en cada uno fueron consideradas demasiado laboriosas. De igual forma, postulamos que los aislados de los mismos taxones podrían causar diferencias en su virulencia. El ensayo de patogenicidad de disco foliar sirvió como una detección rápida, permitiendo así la observación de todos los aislados. La presencia de una lesión necrótica de más de 3 mm causada por el tapón de agar fue considerada como un indicador positivo, en comparación con los controles. Estos consistieron en un tapón de agar sin micelio y de *Trichoderma harzianum*, un hongo beneficioso. Con el ensayo de disco foliar no notamos ninguna diferencia significativa entre los aislados del mismo taxón, mientras que *P. theae* presentó la lesión necrótica más grande entre todos los otros taxones ($p < 0,05$) (datos no presentados). En este estudio, las lesiones necróticas no se parecían a los síntomas característicos de la mancha foliar elíptica con un halo de color naranja, posiblemente debido a las condiciones del ensayo, utilizando folíolos inmaduros de palma de aceite en lugar de maduros. En cualquier caso, las lesiones necróticas son suficientes como un indicador positivo.

El ensayo de patogenicidad con plantas de vivero requirió varias rondas de optimización. Es importante destacar que se puede inducir la infección temprana a través de heridas, aunque no es necesario en la medida en que se mantengan los niveles de temperatura y humedad. Las respuestas a la enfermedad, es decir la gravedad, también puede variar dependiendo de los materiales de siembra (linajes genéticos), además de las condiciones de crecimiento de las palmas antes de la inoculación; es decir, en suelos no estériles vs. en arena estéril lavada con ácido. Después de optimizar el protocolo de inoculación en viveros, se evaluó la patogenicidad sin causar heridas. Además de los síntomas de la enfermedad, presencia de manchas necróticas, también se clasificó la gravedad con base en el número de manchas foliares. Para cada taxón de *Pestalotiopsis*,

se seleccionaron dos o tres aislados para realizar pruebas de patogenicidad y evaluarlos independientemente. Las pruebas revelaron que *P. theae*, *P. microspora*, *P. virgulata*, *P. versicolor* y *P. crassiuscula* eran patogénicos a la palma de aceite de vivero, pero que otros taxones de *Pestalotiopsis* no lograron inducir síntomas de la enfermedad (Figura 2). Los resultados del ensayo de patogenicidad de disco foliar también se correlacionaron con el estudio de inducción en vivero ($R^2 = 0,87$). Sin embargo, los síntomas de la enfermedad con aislados individuales no se asemejaban a los síntomas en campo y, a menudo, carecían del halo de color naranja alrededor de los centros color marrón.

A partir de este estudio y de los trabajos de aislamiento, se identificaron un total de 23 géneros de ascomicetos de 242 aislados de hongos. Consecuentemente, *Phomopsis phaseoli* y *Aspergillus niger* también fueron aislados junto con *Pestalotiopsis* spp. Sin embargo, la inoculación de plantas saludables con una suspensión de esporas conformada por *P. theae*, *P. phaseoli* y *A. niger* (Figura 3) no solo resultó en síntomas de la enfermedad bastante similares a los de campo, sino que también aumentó la gravedad de la misma. El reaislamiento exitoso de los tres inoculantes, junto con los síntomas esperados de la enfermedad, cumple con los postulados de Koch.

Las pruebas de patogenicidad se realizaron según lo descrito en Materiales y métodos. Cada tratamiento consistió en tres cámaras húmedas, con seis plantas por cámara. La patogenicidad también estuvo basada en la reproducibilidad entre los tres tratamientos replicados.

Conclusión

En este estudio confirmamos que la palma de aceite alberga una variedad de *Pestalotiopsis* spp., incluyendo taxones patógenos y no patógenos y, además, que la gravedad de la enfermedad es influenciada por sus interacciones con otros hongos. Si bien *Phomopsis phaseoli* y *Aspergillus niger* estuvieron implicadas para influenciar los síntomas y la gravedad de la enfermedad, otros hongos que ocurren naturalmente también pueden hacerlo. La ocurrencia, así como la interacción entre varios taxones de hongos, tiene implicaciones sobre las medidas de control de la enfermedad, determinando la concentración inhibitoria (IC50) de fungicidas.

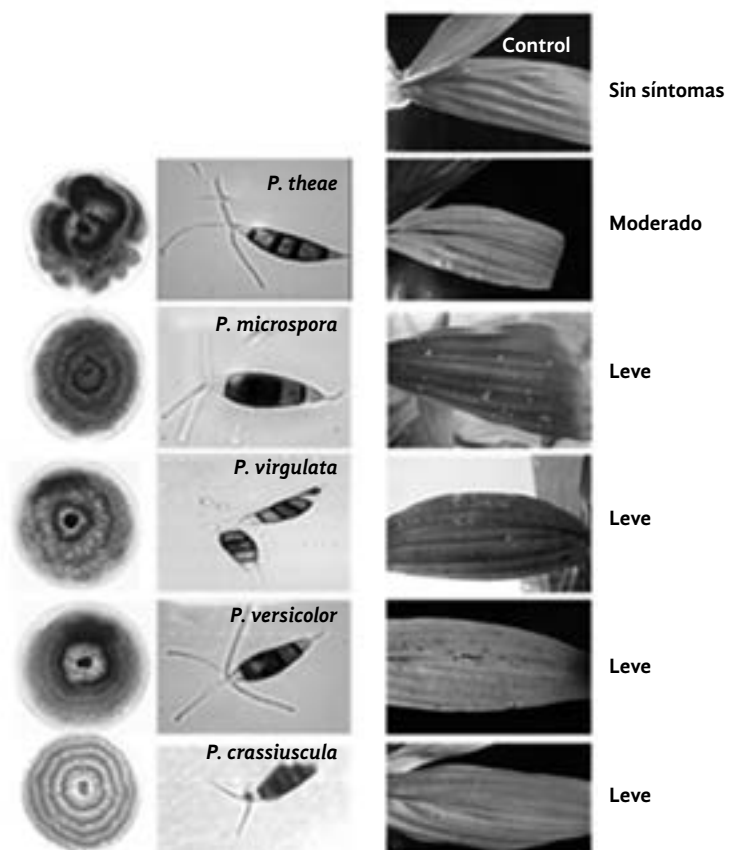
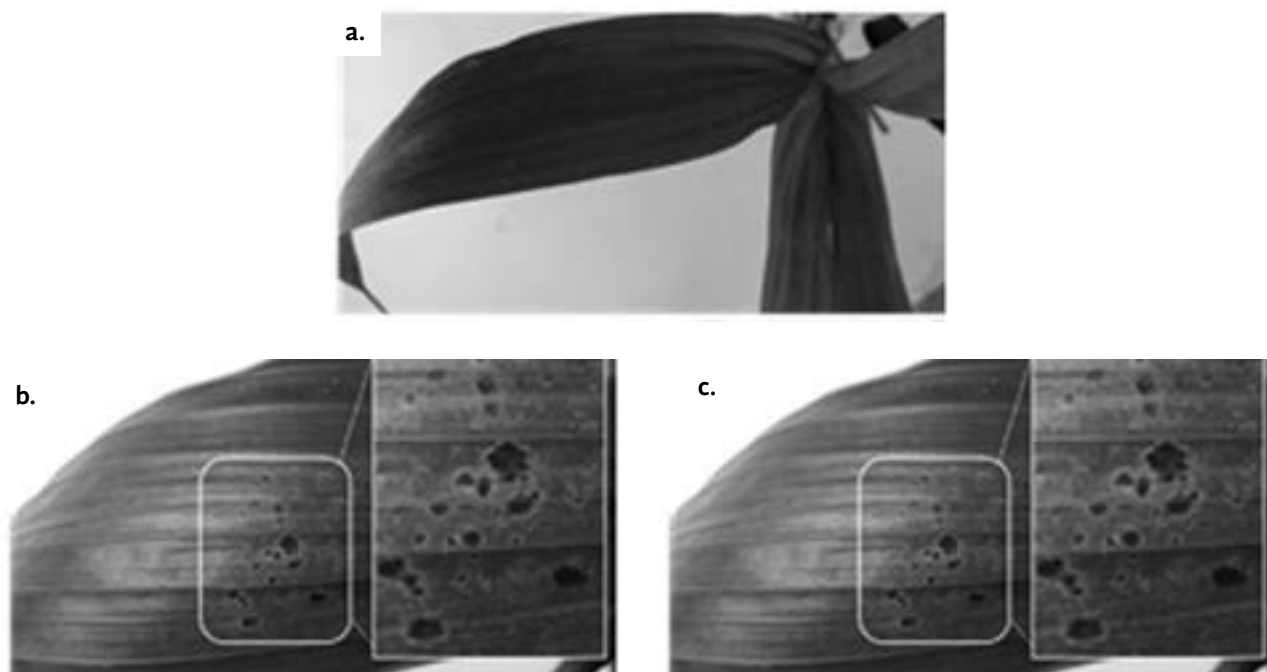


Figura 2. Síntomas de la enfermedad de manchas foliares en palma de aceite de vivero inoculada con diferentes taxones de *Pestalotiopsis*.

Figura 3. Síntomas de enfermedad de manchas foliares en palma de aceite de vivero inoculada con a. *P. theae*, b. *A. niger* y c. *P. phaseoli*.



Agradecimiento

Los autores queremos agradecer a nuestros patrocinadores, Messrs Kuala Lumpur Kepong Berhad y Boustead Plantations Berhad, por su fuente continua de financiación, el acceso a sus plantaciones de palma de aceite y el permiso para publicar este estudio.

Referencias

- Aldana, R. C., Aldana, J. A., Guerrero, H. C., & Bautista, P. N. (2009). *Manual de plagas de la palma de aceite en Colombia*. Bogotá: Cenipalma.
- Escalante, M., Damas, D., Márquez, D., Gelvez, W., Chacón, H., Díaz, A., & Moreno, B. (2010). Diagnóstico y evaluación de *Pestalotiopsis* e insectos inductores en plantaciones de palma aceitera al sur del Lago de Maracaibo, Venezuela. *BioAgro*, 22, 211-216.
- Keith, L. M., Velásquez, M. E., & Zee, F. T. (2005). Identification and characterization of *Pestalotiopsis* spp. causing scab disease of guava, *Psidium guajava*, in Hawaii. *Plant Disease*, 90, 16-23.
- Labarca, M., Sanabria, N., & Arcia, A. (2006). *Pestalotiopsis palmarum* Cooke pathogenicity on nursery-oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) plants. *Revista Facultad de Agronomía*, 23, 414-421.
- Maharachchikumbura, S. S., Guo, L. D., Chukeatirote, E., Bahkali, A. H., & Hyde, K. D. (2011). *Pestalotiopsis*, morphology, phylogeny, biochemistry and diversity. *Fungal Diversity*, 50, 167-187.
- Maharachchikumbura, S. S., Hyde, K. D., Groenewald, J. Z., Xu, J., & Crous, P. W. (2014). *Pestalotiopsis* revisited. *Studies in Mycology*, 79, 121-186.
- Martínez, L. C., & Plata-Rueda, A. (2013). *Lepidoptera* vectors of *Pestalotiopsis* fungal disease: first record in oil palm plantations from Colombia. *International Journal of Tropical Insect Science*, 33, 239-246.
- Shen, H. F., Zhang, J. X., Lin, B. R., & Pu, X. M. (2014). First report of *Pestalotiopsis* microspora causing leaf spot of oil palm (*Elaeis guineensis*) in China. *Disease Notes*, 10, 1429.
- Suwannarach, N., Sujarit, K., Kumla, J., Bussaban, B., & Lumyong, S. (2013). First report of leaf spot disease on oil palm caused by *Pestalotiopsis theae* in Thailand. *Journal of General Plant Pathology*, 79, 277-279.
- Watanabe, K., Motohashi, K., & Ono, Y. (2010). Description of *Pestalotiopsis pallidotheae*: a new species from Japan. *Mycoscience*, 51, 182-188.

Control biológico de insectos plaga de palma de aceite en Indonesia*

Biological Control of Oil Palm Insect Pests in Indonesia

AUTORES: Hari Priwiratama, Agus Eko Prasetyo, Agus Susanto.

CITACIÓN: Priwiratama, H., Prasetyo, A. K., & Susanto, A. (2019). Control biológico de insectos plaga de palma de aceite en Indonesia. *Palmas*, 40 (Especial Tomo I), 77-93.

PALABRAS CLAVE: *M. anisopliae*, *B. bassiana*, *C. militar*, *B. thuringiensis*, baculovirus, feromonas, trampa de frutas, bioinsecticida.

KEYWORDS: *M. anisopliae*, *B. bassiana*, *C. militar*, *B. thuringiensis*, baculovirus, pheromones, fruit trap, biopesticide.

*Artículo original recibido en inglés y traducido por Carlos Arenas París.



HARI PRIWIRATAMA

Instituto de Investigación en Palma de
Aceite de Indonesia
Indonesian Oil Palm Research Institute
(IOPRI)

Resumen

Desde la implementación obligatoria del Aceite de Palma Sostenible en Indonesia (ISPO), el control biológico se ha convertido en la primera alternativa para regular los insectos plaga en la mayoría de plantaciones de palma de aceite de Indonesia. Estos incluyen la conservación de depredadores y parasitoides, el uso de hongos, virus, bacterias, cebos e insecticidas de origen vegetal. La conservación de predadores y parasitoides, mediante el manejo ecológico, ha sido una práctica común tanto en plantaciones comerciales como pequeñas. El *Metarhizium anisopliae* se encuentra entre las especies de hongos entomopatógenos ampliamente utilizados para menguar las poblaciones de los principales insectos plaga. Se ha demostrado que la combinación de *M. anisopliae* y un cebo, reducen la población de escarabajos rinoceronte. La aplicación de baculovirus y *Bacillus thuringiensis* es bastante prometedora para

controlar orugas. La fumigación continua con baculovirus, en una finca de palma de aceite, mantuvo la población de *Setothosea asigna* bajo el umbral económico durante dos años consecutivos. Por otra parte, *B. thuringiensis* demostró ser efectiva contra larvas de lepidópteros. Además de los enemigos naturales, el uso de cebos e insecticidas naturales también logró reducir la población de escarabajos rinoceronte y gusano del saco, respectivamente. La formulación de enemigos naturales quizás siga siendo un reto para la implementación de controles biológicos en las plantaciones de palma de aceite.

Abstract

Since the mandatory implementation of the Indonesian Sustainable Palm Oil (ISPO), biological control has becoming the first alternative for controlling insect pests in most of oil palm plantations in Indonesia. These including the conservation of predators and parasitoids, the utilization of fungi, viruses, bacteria, lures, and the plant-based insecticide. Conservation of predators and parasitoids through ecological management has been a common practice in commercial as well as smallholder plantation. *Metarhizium anisopliae* is among entomopathogenic fungal species that has been widely used to suppress the population of major insect pest. Combination of *M. anisopliae* and lure has been demonstrated to reduce the population of rhinoceros beetle. The application of baculoviruses and *Bacillus thuringiensis* shows a great promise for controlling nettle caterpillars. Continuous spraying of baculoviruses was demonstrated in an oil palm estate where the population of *Setothosea asigna* was successfully maintained under the economic threshold for two consecutive years. *B. thuringiensis*, on the other hand, was proven effective against nettle caterpillars and bagworms. Next to natural enemies, the use of lures and natural insecticides were also capable of decreasing rhinoceros beetle and bagworm population, respectively. Formulation of natural enemies perhaps remain as a challenge for the implementation of biological control in oil palm plantations.

□

Introducción

Las pérdidas económicas debido a las infestaciones de plagas se están convirtiendo en una gran amenaza para la industria de la palma de aceite. Durante muchos años, la aplicación de insecticidas ha sido una práctica común para controlar los insectos plaga en las plantaciones de palma de aceite de Indonesia (Susanto *et al.*, 2013). Desafortunadamente, el empleo constante de estos tiene un impacto negativo sobre los otros insectos, incluyendo predadores, parasitoides y polinizadores (Wood, 2002). Adicionalmente, el uso no controlado de insecticidas puede causar brotes de plagas, ya sea mediante resistencia o mecanismos de resurgimiento (Gitau *et al.*, 2009; Norman *et al.*,

2011; Rozziansha *et al.*, 2012). Por ejemplo, el último caso se observó en 2012, cuando el brote de una nueva oruga, *Pseudoresia desmierdechenoni*, causó un daño masivo a la palma de aceite en Batu Bara, Sumatra Septentrional (Prasetyo & Susanto, 2014). Por otro lado, la continua recurrencia de orugas urticantes en varias plantaciones de Indonesia indica la pérdida de insectos benéficos efectivos que, naturalmente, mantenían a la plaga por debajo del umbral económico.

El uso de controles biológicos como la primera opción para el manejo de las poblaciones de insectos plaga se está volviendo más popular desde que comenzó en 2012 la implementación obligatoria de la regulación de Aceite de Palma Sostenible de Indonesia (ISPO, por sus siglas en inglés). Con esta, se insta a las plantacio-

nes a adoptar los conceptos del Manejo Integrado de Plagas (MIP), haciendo énfasis en el control biológico como la columna vertebral para resolver los problemas de plagas. Esto incluye el uso de enemigos naturales, es decir predadores, parasitoides, hongos entomopatógenos, nematodos, virus y bacterias. Y adicionalmente, la aplicación de productos ecológicos tales como feromonas de insectos, trampas de frutas e insecticidas basados en plantas. A continuación, se discutirá más a fondo el progreso en la implementación de controles biológicos de los insectos plaga en la industria indonesia de la palma de aceite.

Conservación de predadores y parasitoides para el control natural de orugas defoliadoras

La palma de aceite en Indonesia está sufriendo el ataque de orugas defoliadoras, más específicamente, gusanos canasta, orugas urticantes y polillas. La infestación severa de orugas defoliadoras puede ocurrir rápidamente, ya que sus ciclos de vida son cortos pero sus tasas de reproducción altas. En un nivel elevado de infestación, estas orugas son capaces de causar defoliación masiva en palma de aceite, lo que puede llevar a pérdidas en el rendimiento de más de 40 % durante el primer y segundo año (Wood *et al.*, 1973; Basri *et al.*, 1995; Syed & Saleh, 1998; Kamarudin & Wahid, 2010; Potineni & Saravanan, 2013). La reducción en el primer año se atribuye al aborto de inflorescencias, mientras que en el segundo se debe a un efecto en la proporción de sexos en las inflorescencias (Corley & Tinker, 2016).

Se han identificado aproximadamente 11 predadores y 33 parasitoides como enemigos naturales de las orugas defoliadoras de palma de aceite en Sumatra Septentrional, Indonesia (Sipayung *et al.*, 1988). Sin embargo, se encontró que tan solo cuatro de ellos atacaban y tenían un impacto significativo sobre estas: *Sycanus dichotomus*, *Cosmolestes picticeps* (Reduviidae), *Eucanthecona furcellata* (Pentatomidae) y *Callimerus arcufer* (Cleridae) (Sipayung *et al.*, 1988; Mariau *et al.*, 1991; Norman y Basri, 2007). Los últimos dos son los principales predadores de orugas urticantes y de larvas de polillas. Por otra parte, *S. dichotomus* y *C. picticeps* son predadores del gusano canasta, así como de *Setothosea assigna* y orugas de

polillas. La observación de campo mostró que la población de *C. picticeps* era mayor en el área en la que ocurrían brotes de *Metisa plana*, sugiriendo su papel como predador principal de esta, en las plantaciones de palma de aceite (Jamian *et al.*, 2015). Se desarrolló un método para la cría masiva de los insectos predadores (Prawirosukarto *et al.*, 1990; Dongoran *et al.*, 2009), que se ha implementado regularmente para mantener y aumentar sus poblaciones en algunas plantaciones de Indonesia.

Además de los depredadores, los insectos parasitoides también juegan un papel importante para controlar las poblaciones de orugas defoliadoras. *Brachymeria lasus*, *Spinaria spinator*, *Fornicia ceylonica*, *Apanteles aluella*, *A. metisae* y *Trichogrammatoidea thoesae* están entre aquellos que cuentan con un alto nivel de parasitismo sobre estas. El análisis de larvas parasitadas de *M. corbeti* muestra que el 60 % de las orugas jóvenes fueron parasitadas por *Apanteles* sp. y que el 20 % de las más adultas lo fueron por taquíniidos (Syed & Saleh, 1998). En otra observación, con la presencia de *B. lasus* y *C. arcufer*, la población de *M. plana* se redujo de 38 larvas/hoja a menos de 10 larvas/hoja en cuatro años (Mariau *et al.*, 1991). En Malasia se presentó una reducción de más del 30 % de *M. plana* con la presencia de sus parasitoides (Cheong *et al.*, 2010). A pesar de su efectividad, en Indonesia no se ha reportado la crianza masiva de parasitoides para controlar los brotes de plagas de insectos.

Parece que la composición de la vegetación es uno de los factores que influyen en la abundancia de predadores y parasitoides en plantaciones de palma de aceite. La ocurrencia de predadores y las tasas de depredación fueron mayores cerca de los bordes de los lotes, donde hay otros tipos de vegetación como arbustos o bosque secundario (Nurdiansyah *et al.*, 2016). La investigación también demostró que las tasas de depredación disminuyeron significativamente al alejarse de los bordes. Esto sugiere que es necesario diversificar la vegetación para apoyar a los enemigos naturales al interior de la plantación de palma de aceite.

Uno de los enfoques para promover la diversificación es mantener hileras de maleza entre los surcos de palma de aceite. En otro estudio, se encontró que la población de insectos benéficos era mayor en plantaciones en las que abundan las hileras de maleza y

las malezas epífitas (Suzanti *et al.*, 2016). Un planteamiento más popular para aumentar la población de predadores y parasitoides, es la introducción de plantas beneficiosas, tales como *Antigonon leptopus*, *Cassia cobanensis*, *C. tora*, *Euphorbia heterophylla*, *Tennera subulata* o *T. ulmifolia* (Basri *et al.*, 1999). Saleh y Siregar (2017) demostraron que el número de predadores y parasitoides era mayor en bloques en los que se había plantado *A. leptopus* o *T. subulata*. Así, se logró mantener la población de *Setothosea assigna* por debajo del umbral económico durante dos años consecutivos. En contraste, se registraron tres brotes de *S. assigna* en bloques sin plantas beneficiosas. Hoy en día, el cultivo de estas plantas es una práctica común en la mayoría de plantaciones de palma de aceite en Indonesia.

Uso de hongos entomopatógenos para controlar insectos plaga

Metarhizium anisopliae, *Beauveria bassiana* y *Cordyceps militaris* son tres de los principales hongos entomopatógenos que han sido utilizados para controlar insectos plaga en las plantaciones de palma de aceite en Indonesia (Prawirosukarto *et al.*, 1997; Susanto *et al.*, 2005; Soetopo & Indrayani, 2007; Priwiratama & Susanto, 2014). De estos, *M. anisopliae* es el más popular entre los cultivadores. A pesar de tener un amplio rango de hospedadores (Stolz, 1999), es conocido por su desempeño en contra del escarabajo rinoceronte, *Oryctes rhinoceros* (Bedford, 2013). La infección natural de *M. anisopliae* sobre las larvas de *O. rhinoceros* fue reportada por primera vez en los 60 (Wood, 1968), y el primer intento para controlar las larvas se realizó en los 70 (Latch & Falloon, 1976). De las múltiples variedades identificadas, *M. anisopliae* var. *major* es la más patogénica contra *O. rhinoceros* (Tulloch, 1979). Desde este hallazgo, se han realizado múltiples investigaciones en términos de su biología y eficacia en contra del escarabajo rinoceronte (Susanto *et al.*, 2005; Ramle *et al.*, 2006; Priwiratama y Susanto, 2014).

La propagación en masa de *M. anisopliae* en Indonesia comenzó en los años 80, utilizando maíz partido como sustrato sólido para la esporulación. Una prueba de eficacia demostró el potencial de este hon-

go para ser desarrollado comercialmente como una herramienta biológica para controlar el *O. rhinoceros* (Sitepu *et al.*, 1988). Pero no fue sino hasta la década del 2000 que se realizó una aplicación de *M. anisopliae* a gran escala para reducir la población de escarabajos en las plantaciones de palma de aceite en Indonesia (Susanto *et al.*, 2006; Susanto *et al.*, 2007a). El primer intento se realizó en Teluk Dalam, provincia de Riau, donde viven abundantes larvas de *Oryctes* en racimos vacíos de fruta (RFV) en el sistema de siembra de agujeros grandes (Susanto *et al.*, 2006). Una medida curativa que utiliza 100 g de *M. anisopliae* por agujero fue exitosa al reducir la población de larvas con una mortalidad de hasta el 75 %, siete semanas después de la aplicación (SDA). El tratamiento se repitió en diferentes sitios y causó una reducción de más del 50 % en el mismo lapso de tiempo. El siguiente año, dos fórmulas de *M. anisopliae* desarrolladas comercialmente, en polvo y en gránulos, fueron aplicadas con éxito en una dosis de 20 g/m² por RFV en el distrito de Asahan, Sumatra Septentrional, Indonesia (Susanto *et al.*, 2007a). La fórmula en polvo tiene un mejor rendimiento en campo, con una mortalidad de larvas 15 % más alta que el gránulo. El primer signo de infección se detectó de 10 a 14 días después de la aplicación (DDA), con una mortalidad máxima de seis a siete semanas. En ambos sitios y al año siguiente, se observó una infección recurrente de *M. anisopliae*, la cual sugiere que el hongo tenía la capacidad de sobrevivir en el campo.

La aplicación de *M. anisopliae* suele combinarse con otras medidas de control para aumentar la tasa de éxito, particularmente cuando la materia orgánica es abundante en el campo. Por ejemplo, en plantaciones de turba, el *O. rhinoceros* es capaz de vivir en el suelo, ya que este está compuesto de desechos orgánicos. En esta situación, la sola aplicación de *M. anisopliae* se vuelve menos eficiente, ya que se requeriría una gran cantidad para cubrir toda el área. Por lo tanto, se realiza un enfoque más específico, junto con el trampeo orgánico (Simanjuntak *et al.*, 2011). La trampa, compuesta de RFV mezclados con *M. anisopliae* y cebos (feromona agregada), pretende atraer el escarabajo *Oryctes* de manera que no pongan sus huevos en el suelo. Las larvas que se desarrollan no pueden seguir creciendo, ya que se infectan con el hongo. Se adoptó un ensayo similar para controlar la población de *Oryctes* en plantaciones

de coco, con gran éxito seis meses después de la aplicación (Witjaksono *et al.*, 2015).

Además del *O. rhinoceros*, *M. anisopliae* también tiene una gran potencia contra *Coptotermes curvignathus*, una de las principales especies de termita que ataca la palma de aceite (Rozziansha *et al.*, 2013; Khairunnisa *et al.*, 2014; Yii *et al.*, 2015). Durante una prueba de campo, se aplicaron esporas del hongo (10^8 /ml) junto con un cebo de cartón en un sistema de cebado de termitas (TBS) (Rozziansha *et al.*, 2013). El resultado mostró una reducción significativa en los ataques, 45 DDA en un bloque tratado. Se están realizando ensayos para este método en varios sitios.

Junto a *M. anisopliae*, se ha reportado la infección de *B. bassiana* en varios insectos plaga de la palma de aceite, incluyendo el gusano canasta, orugas urticantes, escarabajos, gorgojos y termitas (Ramlah Ali *et al.*, 1993; Ramle *et al.*, 1995; Dembilio *et al.*, 2010; Tajuddin *et al.*, 2010; Ginting *et al.*, 2013; Susanto *et al.*, 2013). A pesar de que se han realizado pruebas de patogenicidad que resultaron prometedoras, la información trazable de su aplicación en el campo es insuficiente. La infección de *B. bassiana* en insectos plaga de la palma de aceite en Indonesia, se registró desde los 80 (Sipayung *et al.*, 1988). Sin embargo, el progreso en el desarrollo de este hongo como un agente de control biológico es lento, y desde entonces solo existe un reducido número de investigaciones sobre su eficiencia en el campo. Quizás se encontraron buenos ejemplos de eficiencias a pequeña escala en Indonesia en contra de *Darna trima* y la termita *C. curvignathus* (Ginting *et al.*, 2013; Susanto *et al.*, 2013). La aplicación de *B. bassiana* en una fórmula efervescente logró causar una mortalidad del 100 % de *D. trima* en viveros, sugiriendo un gran potencial para utilizar la fórmula en pruebas a gran escala (Susanto *et al.*, 2013). Otro estudio, en el que se aplicó composta mezclada con *B. bassiana*, como trampa orgánica para controlar los ataques de *C. curvignathus* en una plantación de turba, también mostró resultados prometedores (Ginting *et al.*, 2013).

La búsqueda de un virus contra *Oryctes* comenzó en los años 50, cuando el escarabajo destruyó palmas de coco en muchas regiones, particularmente en el Pacífico Sur.

A diferencia de *M. anisopliae* y *B. bassiana*, *C. militaris* tiene un estrecho rango de hospedadores. Este hongo es altamente patogénico contra las orugas urticantes, que infecta principalmente las pupas (Evans, 1987; De-Chenon *et al.*, 1990). Los esfuerzos para su producción en masa y uso en las plantaciones de palma de aceite en Indonesia, comenzaron en los 90 (Papierok *et al.*, 1993; Wibowo *et al.*, 1994). En 1996, se inició una prueba de eficiencia del hongo contra *Setothosea asigna*, utilizando maíz quebrado como sustrato sólido (Pardede *et al.*, 1996). En el estudio, la mortalidad de pupas de *S. asigna* varió entre el 40 y el 80 %, sugiriendo la potencia del uso de este hongo. Infortunadamente, no logramos encontrar reportes de la aplicación de *C. militaris* a gran escala. Quizás, esto se debe a que la recolección manual de pupas es mucho más efectiva para reducir directamente su población en el campo (Susanto *et al.*, 2012b).

Desarrollo de virus como agente de control biológico contra escarabajo rinoceronte y oruga urticante

La búsqueda de un virus contra *Oryctes* comenzó en los años 50, cuando el escarabajo destruyó palmas de coco en muchas regiones, particularmente en el Pacífico Sur. No obstante, esta empresa no tuvo éxito (Huger, 2005). En 1963 se detectó el primer signo de infección patógena en larvas de *Oryctes* en una plantación de palma de aceite en Malasia, que después fue confirmada como una infección por virus (Huger, 1966). La primera introducción del virus en Samoa

llevó a una reducción dramática en la población de *Oryctes* en toda la isla (Marschall, 1970). Desde entonces, se ha difundido en muchas regiones en las que se han reportado daños a las plantaciones de palma de coco y de aceite (Hammes, 1978; Gorick, 1980; Young & Longworth, 1981; Zelazny & Alfiler, 1991), incluyendo Indonesia (Zelazny *et al.*, 1992; De-Chenon *et al.*, 1998). Sin embargo, en las últimas décadas, el virus ha recibido poca atención y la investigación para explorar su uso potencial para el control de *Oryctes* en las plantaciones de palma de aceite de Indonesia, ha sido limitada.

En 2014 se realizó una prueba de campo a gran escala de *Oryctes* nudivirus (ORNV) en el distrito de Siak, en la provincia de Riau (Mohd Naim *et al.*, 2016). La liberación de larvas y escarabajos infectados mostró un efecto adverso en la población de *Oryctes* en los bloques tratados. La población se mantuvo en 3,3 larvas/m² y en 11,8 escarabajos/trampa/día, menor que en los bloques no tratados, con 12,2 larvas/m² y 17,5 escarabajos/trampa/día. Creemos que en el futuro cercano habrá más investigaciones que indaguen sobre el potencial de ORNV en Indonesia.

En contraste con el virus *Oryctes*, se han realizado varios estudios para promover baculovirus como un agente de control biológico en contra de la oruga urticante, desde su introducción en la década de los 80 (Sipayung *et al.*, 1989). La primera prueba de campo se llevó a cabo en Sumatra Septentrional, utilizando savia cruda de larvas de *Setora nitens* infectadas a una dosis de 270 g/ha. La aplicación del virus redujo con éxito la población de *S. nitens* hasta 76 % 12 DDA (Si-

payung *et al.*, 1989). El autor también menciona una relación específica de la especie, en la que el virus de larvas *S. nitens* infectadas no fue efectivo en contra de *S. asigna*. Posteriormente, se buscó la infección natural del virus sobre *S. asigna* en todo Indonesia. La identificación mostró que la larva fue infectada por un baculovirus conocido como virus de la poliedrosis nuclear múltiple (VPNM) (Sudharto *et al.*, 1995). La aplicación inicial de 400 g de savia cruda de larvas infectadas por hectárea, logró reducir la población de *S. asigna* en palmas maduras con una tasa de mortalidad del 98,3 %, 20 DDA. Adicionalmente, ese mismo año, la aplicación frecuente de VPNM durante siete meses consecutivos logró suprimir y mantener la población de *S. asigna* bajo control durante dos años (Sudharto *et al.*, 1997). Desde entonces, el virus ha sido introducido en las plantaciones de palma de aceite en Indonesia, para mantener la población de *S. nitens* y *S. asigna*.

En el siglo XX, el uso del VPNM se ha vuelto común para controlar la oruga urticante en grandes plantaciones comerciales. Se realizó una aplicación intensiva de VPNM (250-500 ml/ha) en conjunto con *Bacillus turhingiensis* (750 g/ha) para reducir rápidamente la población de *S. asigna* de solo 8,8 a 1,9 larvas por hoja, en menos de un mes (Cahyasiwi *et al.*, 2010). Esta se mantuvo exitosamente por debajo del umbral económico, durante dos años consecutivos, gracias a la aplicación continua de ambos agentes. El censo en campo mostró que se observaba infección recurrente de VPNM en bloques tratados, sugiriendo el establecimiento del virus en el mismo. En términos de frecuencia de aplicación, solo seis rondas de VPNM fueron necesarias para mantener la población de *S. asigna* controlada durante dos años, en comparación con 12 rondas de insecticida.

En las últimas dos décadas, rara vez se usó el virus en palmas adultas debido a la preocupación de que la fumigación reduciría su desempeño. Sin embargo, si bien las aplicaciones en campo no han sido debidamente documentadas, sugieren que el virus puede admi-

A pesar de los impactos positivos, el uso generalizado de VPNM en Indonesia todavía está muy por debajo del uso de insecticidas, quizás debido a la falta de comprensión en la detección, recolección y almacenamiento de larvas infectadas; especialmente en plantaciones que no cuentan con recursos de investigación y desarrollo.

nistrarse con una herramienta de fumigación, particularmente el tanque doble K-22 Bio. Durante una prueba para controlar *S. asigna* en palmas adultas, se aplicó el virus utilizando una máquina de fumigación con Lambda Cihalotrin (Priwiratama & Susanto, 2014). Los resultados mostraron que el VPNM lograba reducir la población de *S. asigna* en un 90 % 14 DDA, una tasa similar a la de la mortalidad de larvas con el uso del insecticida.

A pesar de los impactos positivos, el uso generalizado de VPNM en Indonesia todavía está muy por debajo del uso de insecticidas, quizás debido a la falta de comprensión en la detección, recolección y almacenamiento de larvas infectadas; especialmente en plantaciones que no cuentan con recursos de investigación y desarrollo. A pesar de que se ha introducido un método simple para propagar el virus en laboratorios (Simanjuntak & Susanto, 2011), la industria necesita con urgencia una formulación lista para utilizar. Recientemente se desarrolló una en polvo de VPNM utilizando productos naturales (Simanjuntak *et al.* 2016). La eficiencia inicial en invernadero mostró un resultado prometedor, con una mortalidad de más del 80 % de larvas de *S. asigna* tres DDA. Las pruebas de campo a gran escala están programadas y las conclusiones serán informadas en el futuro cercano.

El papel de *Bacillus thuringiensis* en el control de orugas defoliadoras de palma de aceite

Bacillus thuringiensis (Bt) es una bacteria grampositiva con apariencia de bastón y que forma esporas. Ha sido ampliamente utilizada como agente de control biológico para insectos plaga en cultivos comerciales (Morris *et al.*, 1997), incluyendo la palma de aceite (Basri *et al.*, 1994). Bt es tan popular que se puede encontrar con facilidad en el mercado. Durante décadas, esta bacteria ha sido empleada en Indonesia para controlar la oruga urticante, el gusano del saco y la polilla del racimo (Sipayung & Sudhar-to, 1985; Sipayung, 1991; Ginting *et al.*, 1995; Prasetyo *et al.*, 2018).

En los 90 se realizó un estudio de varios aislamientos autóctonos de Bt en contra de *S. asigna*. La mortalidad de larvas varió de 3,3 a 43,3 %, significativamente más

baja en comparación con la formulación comercial de Bt, que variaba de 96,6 a 100 % en intervalos de tiempo similares (Pardede, 1992). En otra prueba de campo, Bt comercial esparcido a una dosis de 250 ml/ha logró matar larvas de *S. asigna* a más del 80 % tres DDA, mortalidad que aumentaba a más del 95 % con siete DDA (Rozziansha y Prasetyo, 2017a). El estudio sugiere la necesidad de un uso repetido para prevenir la recurrencia de ataques de *S. asignay* mantener la población de orugas urticantes bajo control. Esto fue demostrado en la finca Bukit Sentang, en Sumatra Septentrional, cuando se realizó una aplicación continua y a gran escala de Bt en contra de ataques múltiples de *D. trima* y *S. asigna* (Pardede, 1992). El tratamiento redujo con éxito el área total infestada de 163 ha a tan solo tres ha en menos de un año. Con una aplicación consistente, la población de *D. trima* y *S. asigna* se mantuvo por debajo del umbral económico durante cinco años consecutivos (Pardede, 1992; Pardede *et al.*, 1996).

Se ha reportado que el uso de Bt para superar los brotes de gusanos del saco ha tenido gran éxito en Malasia e Indonesia (Susanto, 2010; Ramlah *et al.*, 2013; Ahmad *et al.*, 2017; Kamarudin *et al.*, 2017). En Johor, Malasia, la aspersión aérea y continua de Bt logró reducir la población de *M. plana* en hasta 90,8 % en seis meses (Kamarudin *et al.*, 2017). En Indonesia, se logró una reducción significativa en el distrito de Batubara, Sumatra Septentrional (Susanto, 2010). En otro sitio, la mortalidad de *M. plana* se encontró entre el 94 y el 98 % a los siete días de la aspersión de Bt. Además, la bacteria fue utilizada para controlar *Mahase-na corbetti* en palmas de aceite maduras y altas. El Bt fue suministrado por máquinas de aspersión de uno y dos tanques, para garantizar la cobertura del dosel de la palma. Sorprendentemente, se observó una mortalidad de más del 90 % con ambos equipos de fumigación (Rozziansha y Prasetyo, 2017b). La clave del éxito es la solución homogénea de Bt-combustible-agua en el momento apropiado de aplicación.

Durante los últimos cinco años hemos observado un aumento en los ataques de la polilla del racimo *Tirathaba rufivena* en Riau y Borneo, especialmente en plantaciones donde predomina la turba y el suelo arenoso. Daños severos ocurrían comúnmente en palmas jóvenes maduras de entre tres y siete años de edad. En respuesta, se aplicó una aspersión de Bt a largo plazo en el distrito de Indragiri Hulu, en Riau

(Prasetyo *et al.*, 2018). Esta se realizó en intervalos de dos semanas y durante nueve meses consecutivos en palmas de siete años de edad, que fueron altamente atacadas por *T. rufivena*. Los resultados mostraron que la población de larvas se redujo significativamente después de cuatro meses de aspersión, a pesar de la superposición de etapas de los insectos (Prasetyo *et al.*, 2018). Adicionalmente, y luego de cinco meses, se eliminaron por completo los ataques de la polilla del racimo. El estudio también incluyó los efectos a largo plazo de la exposición a Bt del gorgojo polinizador *Elaeidobius kamerunicus*. La población de este no se vio afectada, indicando el uso seguro de Bt para el insecto benéfico. Una pesquisa anterior, también mostró que la aplicación de Bt no tenía efectos negativos en el gorgojo polinizador (Najib *et al.*, 2009).

Nematodo entomopatógeno

La investigación para explorar los nematodos como agente de control biológico de *O. rhinoceros* comenzó en la última década a través del aislamiento de un nematodo parásito conocido como *Steinernema carpocapsae*, encontrando que este era altamente patógeno para las larvas de *Oryctes* (Novilih, 2010b; Sari *et al.*, 2011). El estudio de laboratorio mostró un resultado prometedor en el que *S. carpocapsae* causó hasta 100 % de infección en larvas del tercer estadio (Novilih, 2010a). En contraste, la prueba de campo posterior al bioensayo resultó decepcionante. Había menos de 1 % de larvas de *Oryctes* infectadas por el nematodo. El estudio sugirió que la aplicación del nematodo se puede ver altamente afectada por las condiciones ambientales. Desde entonces, ha habido varias investigaciones sobre el potencial de *S. carpocapsae* y *Heterorhabditis* sp. contra larvas de *Oryctes* en laboratorios o invernaderos, pero ninguna ha demostrado ser efectiva en el campo.

Trampas de feromonas como enfoque amigable con el ambiente para el control de plagas de coleópteros

La captura con feromonas (ferotrapas) se ha convertido, sin lugar a dudas, en una herramienta im-

portante en el manejo integrado de plagas (MIP) para controlar, particularmente a *O. rhinoceros* en plantaciones de palma de aceite. El descubrimiento del etil-4-metiloctanoato (E4-MO) en los 90, ha afectado enormemente las estrategias de control del *O. rhinoceros* en Indonesia (De-Chenon *et al.*, 1997). Básicamente, el compuesto es un agregado de feromonas del escarabajo macho de *O. rhinoceros* (Hallett *et al.*, 1995). Desde el 2006, la feromona ha sido producida sintéticamente por el Instituto Indonesio de Investigación de la Palma de Aceite (IOPRI, por sus siglas en inglés) y está disponible comercialmente en un dispensador de liberación retardada, que puede durar hasta tres meses en el campo (Utomo *et al.*, 2006; Susanto *et al.*, 2012c). Este agregado resulta mejor para atraer escarabajos *Oryctes* en comparación con el crisantemato de etilo (Hallett *et al.*, 1995).

Las ferotrapas no solo son efectivas para la captura masiva de escarabajos; también son una herramienta para monitorear las poblaciones de estos en el campo (Chung, 1997; Purba *et al.*, 2001; Norman y Basri, 2004; Utomo *et al.*, 2006; Tobing *et al.*, 2007). Se han probado varios tipos (De-Chenon *et al.*, 1997; De-Chenon *et al.*, 2001; Prasetyo *et al.*, 2009; Rozziansha & Susanto, 2012), de las que la de doble aspa y soporte de PVC son las más efectivas. La trampa funciona mejor al ubicarse entre tres y cuatro metros por encima del suelo, a una densidad de una trampa por dos ha (Susanto *et al.*, 2012a).

El uso de la ferotrapa de E4-MO para controlar los brotes de *Oryctes* fue demostrado en la finca Sei Rokan, en Riau, donde se llevaron a cabo experimentos con intervalos de tres meses durante un periodo de un año (Susanto *et al.*, 2007b). El resultado mostró una reducción significativa de escarabajos atrapados, desde 16 escarabajos/trampa/mes a solo un escarabajo/trampa/mes (Figura 1), con un total de 146.289 escarabajos capturados al final de la observación. El empleo sucesivo de ferotrapas se detuvo después de que la intensidad de los ataques se redujo a menos del 5 %. Desde entonces, la población de *O. rhinoceros* se ha mantenido por debajo del umbral económico, con el uso regular de ferotrapas en la finca.

Actualmente, la instalación de ferotrapas es una práctica común y controla el *O. rhinoceros* en plantaciones comerciales y de pequeños productores. En al-

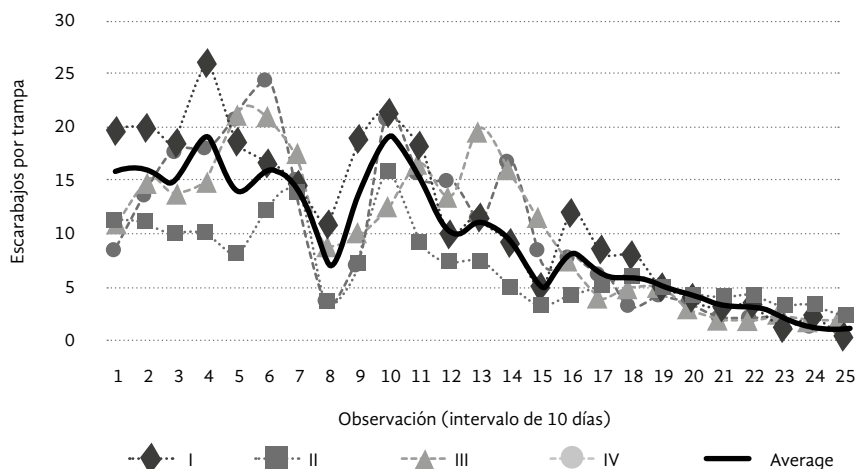


Figura 1. Promedio de escarabajos *Oryctes* capturados en Afdeling I-IV, finca Sei Rokan, de octubre de 2005 a septiembre de 2006.

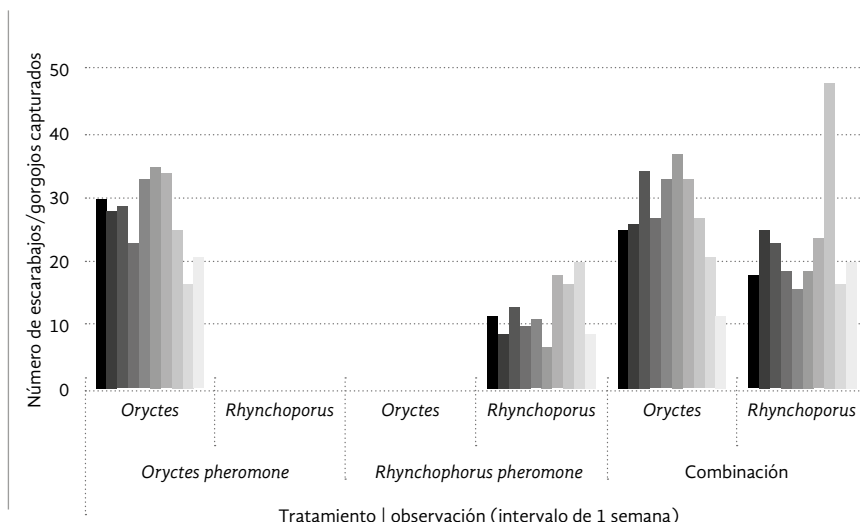


Figura 2. Aplicación de trampas orgánicas en turba.

gunos casos, se combina con otros métodos para mejorar su efectividad. En turba, por ejemplo, un enfoque integrado que combine el uso de feromonas, RFV y *M. anisoplae* para formar trampas orgánicas (Figura 2), es esencial para reducir efectivamente la población originaria, así como para prevenir la ocurrencia de una nueva generación de escarabajos. Un estudio de campo demostró que las trampas orgánicas atraen más escarabajos que la sola ubicación de ferotampas o trampas de RFV (Simanjuntak *et al.*, 2011). De igual manera, el E4-MO también puede combinarse con ORNV para mejorar la captura-liberación de *Oryctes* y así aumentar la potencia de transmisión del virus en el campo.

Además de E4-MO, en Indonesia también se produjo una feromona sintética a partir del picudo rojo *Rhynchophorus ferrugineus*: la 4-metil-5-nonanol (4N-5N). Esta fue probada en conjunto con E4-MO, resultando en un efecto sinérgico de trampa de *Rhynchophorus* (Susanto *et al.*, 2007a; Prasetyo *et al.*, 2009). La eficiencia en campo mostró, según las predicciones, un efecto específico en el que cada feromona atrae su propia especie (Figura 3). Mientras tanto, en la trampa combinada, que contiene una solución premezclada de E4-MO y 4N-5N, el número de *Rhynchophorus* capturados aumentó significativamente en comparación con su aplicación individual.

Figura 3. Escarabajos capturados dentro de las 10 semanas siguientes a la instalación de doble feromona en la región de Rengat, Riau.



Resumen y desafíos

La conservación de los agentes de control biológico es la base para el manejo de insectos plaga en plantaciones de palma de aceite. Promover la población enemiga nativa, parece ser la manera más efectiva de controlarlos, en vez de introducir agentes exóticos de control biológico. Esto se logra mejor a través de enfoques ecológicos. Uno de los esfuerzos es aumentar la heterogeneidad del paisaje que proporciona fuentes adicionales de alimento, nidos y protección contra los enemigos naturales, por ejemplo, sembrando plantas con flores beneficiosas y manteniendo hileras de maleza en los bloques de siembra. A pesar de que las prácticas de control biológico han aumentado de alguna manera, continúa siendo un componente pequeño del manejo general de insectos plaga en las plantaciones de palma de aceite en Indonesia.

Encontramos que el uso limitado de productos de control biológico (hongos, virus y bacterias) en muchas plantaciones, no se debe principalmente a su desempeño contra los insectos plaga específicos, sino a varios problemas técnicos. Estos son el periodo corto de almacenamiento debido a la rápida disminución de

su viabilidad y patogenicidad; el alto volumen de producto que se requiere para la aplicación a gran escala, que a menudo no está disponible en altas cantidades; y al problema de ineficiencia. Por lo tanto, suministrar estas formulaciones de productos de control biológico sigue siendo un gran desafío. Aunque se realizó un gran avance en la formulación con la invención de una tableta efervescente que contiene hongos y bacterias entomopatógenos (Priwiratama & Susanto, 2014), el uso del producto en las plantaciones de palma de aceite es insuficiente, quizás debido a la falta de promoción. No obstante, los investigadores están prestando atención a los problemas y se espera que en el futuro cercano surjan más formulaciones de vanguardia.

Por último, pero no menos importante, la educación a los cultivadores sobre los impactos beneficiosos del control biológico en el manejo de los insectos plaga de la palma de aceite suele ser insuficiente. Suministrar una acción más directa, como consultorías o asistencias de campo, puede contribuir a un mayor impacto para la implementación sostenible de controles biológicos en plantaciones de palma de aceite, y es aquí donde el gobierno puede desempeñar su papel.

Referencias

- Ahmad, M. N., Kamarudin, N., Ahmad, S.N., Arshad, O., Masri, M. M. M., Moslim, R., & Kushairi, A. (2017). Efficacy of pheromone trapping and aerial spraying of *Bacillus thuringiensis* (Bt) for controlling bagworm, *Metisa plana* Walker (Lepidoptera: Psychidae) in Yong Peng, Johor, Malaysia. *Journal of Oil Palm Research*, 29(1), 55-65.
- Basri, M., Norman, K., & Hamdan, A. (1995). Natural enemies of the bagworm, *Metisa plana* Walker (Lepidoptera: Psychidae) and their impact on host population regulation. *Crop Protection*, 14(8), 637-645.
- Basri, M. W., Simon, S., Ravigadevi, S., & Othman, A. (1999). Beneficial plants for the natural enemies of the bagworm in oil palm plantation. In: *Proceeding of 1999 International Palm Oil Congress: Emerging Technologies and Opportunities in the next meillenium*, at Kuala Lumpur, Malaysia.
- Basri, W., Ramlah, A., & Norman, K. (1994). Status report on the use of *Bacillus thuringiensis* in the control of some oil palm pests. *Elaeis*, 6(2), 82-101.
- Bedford, G. O. (2013). Biology and Management of Palm Dynastid Beetles: Recent Advances. *Annual Review of Entomology*, 58(1), 353-372.
- Cahyasiwi, L., Wood, B., Lubis, F., & Caudwell, R. (2010). The economics of *Oryctes* attack in oil palm replants. In: *Proceedings of the International Oil Palm Conference*, 1-3 June 2010, Yogyakarta.
- Cheong, Y., Sajap, A., Hafidzi, M., Omar, D., & Abood, F. (2010). Outbreaks of bagworms and their natural enemies in an oil palm, *Elaeis guineensis*, plantation at Hutan Melintang, Perak, Malaysia. *Journal of Entomology*, 7(3), 141-151.
- Chung, G. F. (1997). The bioefficacy of the aggregation pheromone in mass trapping of *Oryctes rhinoceros* (L) in Malaysia. *The Planter*, 73(852), 119-127.
- Corley, R. H. V., & Tinker, P. B. (2016). *The Oil Palm* (5 ed.). Chichester, UK: Blackwell Science Ltd.
- De-Chenon, R. D., Asmady, H., & Sudharto, P. (2001). New improvement of pheromone traps for the management of the rhinoceros beetle in oil palm plantations. In: *Proceeding of PIPOC 2001 International Palm Oil Congres*, at Kuala Lumpur, Malaysia.
- De-Chenon, R. D., Ginting, C.U., Asmady, H., Sudharto, P., & Sipayung, A. (1998). Importance of rhinoceros beetles in mature oil palm plantations for effective biocontrol. In: *Proceeding of the International Oil Palm Conference 1998, 23-25 December 1998*, at Nusa Dua, Bali.
- De-Chenon, R. D., Ginting, C. U., & Sipayung, A. (1997). Pengendalian kumbang *Oryctes rhinoceros* pada tanaman kelapa sawit secara terpadu. In: *Proceeding of Pertemuan Teknis Kelapa Sawit 1997*, at Jakarta.
- De-Chenon, R. D., Sudharto, P., & Sipayung, A. (1990). Prospects in the use of a fungal pathogen from the genus *Cordyceps* (Ascomycotina) for microbiological control of nettle caterpillars (Limaecodidae). Paper presented at Kongres I HPTI Indonesia, 8-10 February 1990, Jakarta.
- Dembilio, Ó., Quesada-Moraga, E., Santiago-Álvarez, C., & Jacas, J.A. (2010). Potential of an indigenous strain of the entomopathogenic fungus *Beauveria bassiana* as a biological control agent against the Red Palm Weevil, *Rhynchophorus ferrugineus*. *Journal of Invertebrate Pathology*, 104(3), 214-221.
- Dongoran, A. P., Susanto, A., & Sinaga, C. F. A. (2009). Daya predasi *Eocanthecona furcellata* (Wolf.) (Homiptera: Pentatomidae) terhadap ulat api di perkebunan kelapa sawit. In: *Proceeding of Pertemuan Teknis Kelapa Sawit 2009, 28-20 Mei 2009*, Jakarta.

- Evans, H. C. (1987). Fungal pathogens of Limacodidae. In *Slug and nettle caterpillars*, edited by M. J. W. Cock, H. C. J. Godfray and J. D. Holloway, 207-212. UK: CAB International.
- Ginting, P. A., Efendi, G., Masculen, N., Martina, A., Herman, Silalahi, A.J., & Sitorus, A. C. (2013). Studies on the uses of compost and *Beauveria bassiana* as trapping and controlling agents respectively for termites (*Coptotermes curvignathus* L.) in peat soil plantations. In: *Proceeding of PIPOC 2013 International Palm Oil Congress: Green opportunities from the golden crop*, at Kuala Lumpur, Malaysia.
- Ginting, U. C., Pardede, D., & Djamin, A. (1995). Formulasi baru *Bacillus thuringiensis* dan pengaruhnya terhadap ulat *Setothosea asigna* Van Eecke pada perkebunan kelapa sawit. *Warta PPKS*, 3(1), 35-38.
- Gitau, C. W., Gurr, G. M., Dewhurst, C. F., Fletcher, M. J., & Mitchell, A. (2009). Insect pests and insect-vectored diseases of palms. *Australian Journal of Entomology*, 48(4), 328-342.
- Gorick, B. D. (1980). Release and establishment of the baculovirus disease of *Oryctes rhinoceros* (L.) (Coleoptera: Scarabaeidae) in Papua New Guinea. *Bulletin of Entomological Research*, 70(3), 445-453.
- Hallett, R. H., Pérez, A. L., Gries, G., Gries, R., Pierce, H. D., Yue, J., Oehlschlager, A.C., González, L.M., & Borden, J. H. (1995). Aggregation pheromone of coconut rhinoceros beetle, *Oryctes rhinoceros* (L.) (Coleoptera: Scarabaeidae). *Journal of Chemical Ecology*, 21(10), 1549-1570.
- Hammes, C. (1978). Estimation of the effectiveness of *Rhabdionvirus oryctes* (Huger) for controlling *Oryctes rhinoceros* (L) by means of a study of the changes in damage in Mauritius. *Revue Agricote et Sucriere de l'lie Maurice*, 57(4-18).
- Huger, A. M. (1966). A virus disease of the Indian rhinoceros beetle, *Oryctes rhinoceros* (linnaeus), caused by a new type of insect virus, *Rhabdionvirus oryctes* gen. n., sp. n. *Journal of Invertebrate Pathology*, 8(1), 38-51.
- Huger, A. M. (2005). The *Oryctes* virus: Its detection, identification, and implementation in biological control of the coconut palm rhinoceros beetle, *Oryctes rhinoceros* (Coleoptera: Scarabaeidae). *Journal of Invertebrate Pathology*, 89(1), 78-84.
- Jamian, S., Norhisham, A., Ghazali, A., Zakaria, A., & Azhar, B. (2015). Impacts of two species of predatory *Reduviidae* on bagworms in oil palm plantations. *Insect science*, 24(2), 285-294.
- Kamarudin, N., Ali, S. R. A., Masri, M. M. M., Ahmad, N., & Manan, C.A.H.C. (2017). Controlling *Metisa plana* Walker (Lepidoptera: Psychidae) outbreak using *Bacillus thuringiensis* at an oil palm plantation in Slim River, Perak, Malaysia. *Journal of Oil Palm Research*, 29(1), 47-54.
- Kamarudin, N., & Wahid, M. B. (2010). Interactions of the bagworm, *Pteroma pendula* (Lepidoptera: Psychidae), and its natural enemies in an oil palm plantation in Perak. *Journal of Oil Palm Research*, 22(April), 758-764.
- Khairunnisa, A., Martina, A., & Titrawani. (2014). Uji efektivitas jamur *Metarhizium anisopliae* Cps.T.A isolat lokal terhadap hama rayap (*Coptotermes curvignathus*). *JOM FMIPA*, 1(2), 2014.
- Latch, G. C. M., & Falloon, R. E. (1976). Studies on the use of *Metarhizium anisopliae* to control *Oryctes rhinoceros*. *Entomophaga*, 21(1), 39-48.
- Mariau, D., De-Chenon, R. D., & Sudharto, P. (1991). Oil palm insects pests and their enemies in Southeast Asia. *Oléagineux*, 46, 400-476.
- Marschall, K. J. (1970). Introduction of a New Virus Disease of the Coconut Rhinoceros Beetle in Western Samoa. *Nature*, 225, 288.

- Mohd-Naim, A. A., Aryawan, K., Rudi, H. W., and Caliman, J.P. (2016). Control of *Oryctes rhinoceros* through mass release of *Oryctes* larvae and imago infected by *Oryctes nudivirus* (OrNV). In: *Proceeding of the 6th IOPRI-MPOB International Seminar: Current Research and Management of Pests, Ganoderma, and Pollination in Oil Palm for Higher Productivity*, at Medan, Indonesia.
- Morris, O. N., P. Kanagaratnam, P., and Converse, V. (1997). Suitability of 30 Agricultural Products and By-Products as Nutrient Sources for Laboratory Production of *Bacillus thuringiensis* subsp. *aizawai* (HD133). *Journal of Invertebrate Pathology*, 70(2), 113-120.
- Najib, M. A., Ramlah, S. A. A., Mazmira, M. M., & Basri, M. W. (2009). Effect of *Bacillus thuringiensis*, Terakil-1 and Teracon-1 against oil palm pollinator, *Elaeidobius kamerunicus* and beneficial insects associated with *Cassia cobanensis*. *Journal of Oil Palm Research*, 21(4), 667-674.
- Norman, K., & Basri, M. W. (2004). Immigration and activity of *Oryctes rhinoceros* within a small oil palm replanting area. *Journal of Oil Palm Research*, 16(2), 64-77.
- Norman, K., & Basri, M. W. (2007). Status of common oil palm insect pests in relation to technology adoption. *Planter*, 83(975), 371-385.
- Norman, K., Ramle, M., Mazmira, M. M., Mohd-Najib, A., & Ramlah, A. (2011). Bagworms and *Oryctes*: Advances in pests control and management. In: *Proceeding of the Third MPOB-IOPRI International Seminar: Integrated Oil Palm Pests and Diseases Management*, Kuala Lumpur, Malaysia.
- Novilih, D. (2010a). Effectiveness of controlling *Oryctes rhinoceros* L. (Coleoptera: Scarabaeidae) on the oil palm using entomopathogenic nematode (*Steinernema carpocapsae* Weiser). In: *Proceeding of the International Oil Palm Conference 2010*, 1-3 June 2010, Yogyakarta.
- Novilih, D. (2010b). The influence of *Steinernema carpocapsae* Weiser against damage of *Oryctes rhinoceros* L. larvae tissue. In: *Proceeding of the International Oil Palm Conference 2010*, 1-3 June 2010, at Yogyakarta.
- Nurdiansyah, F., Denmead, L. H., Clough, Y., Wiegand, K., & Tschardt, T. (2016). Biological control in Indonesian oil palm potentially enhanced by landscape context. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 232, 141-149.
- Papierok, B., De Chenon, R.D., Freulard, J.M., & Suwandi, W. P. (1993). New perspectives in the use of a *Cordyceps* fungus in the biological control of nettle caterpillars in oil palm plantations. In: *Proceeding of PIPOC 1993 International Palm Oil Congress: Update and Vision*, 10-25 September, Kuala Lumpur, Malaysia.
- Pardede, D. (1992). Kajian pengendalian hama terpadu *Darna trima* Moore (Lepidoptera: Limacodidae) pada tanaman kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.). *Buletin Perkebunan*, 23(2), 103-114.
- Pardede, D., Ginting, C. U., & Wibowo, H. (1996). Pengendalian hama terpadu ulat pemakan daun kelapa sawit *Setothosea asigna* Van Eecke. In *Laporan hasil penelitian APBN Tahun Anggaran 1995/1996, PPKS-AP2I*.
- Potinen, K., & Saravanan, L. (2013). Natural enemies of oil palm defoliators and their impact on pest population. *Pest Management in Horticultural Ecosystems*, 19(2), 179-184.
- Prasetyo, A. E., López, J., Eldridge, J., Zommick, D., & Susanto, A. (2018). Long-term study of *Bacillus thuringiensis* application to control *Tirathaba rufivena*, along with the impact to *Elaeidobius kamerunicus*, insect biodiversity and oil palm productivity. *Journal of Oil Palm Research*, 30(1), 71-82.
- Prasetyo, A. E., & Susanto, A. (2014). Mewaspadai ledakan hama *Pseudoresia desmierdechenoni* pada perkebunan kelapa sawit. *Warta PPKS*, 19(1).

- Prasetyo, A. E., Susanto, A., Utomo, C., & Herawan, T. (2009). The new pherotrap design to catch *Oryctes rhinoceros* in oil palm plantation. In: *Proceeding of PIPOC 2009 International Palm Oil Congress*, 9-12 November 2009, at Kuala Lumpur, Malaysia.
- Prawirosukarto, S., Djamin, A., & Pardede, D. (1997). Pengendalian ulat pemakan daun kelapa sawit secara terpadu. In: *Proceeding of Pertemuan Teknis Kelapa Sawit 1997 - Pengendalian O. rhinoceros dan UPDKS secara terpadu*, at Jakarta.
- Prawirosukarto, S., Sipayung, A., & De-Chenon, R. D. (1990). Mass rearing method of the predator *Eocanthecona furcellata* (Wolf) (Hemiptera: Pentatomidae, Asopinae) with frozen food. *Buletin PPPM*, 10(1), 22-29.
- Priwiratama, H., & Susanto, A. (2014). Utilization of fungi for the biological control of insect pests and *Ganoderma* disease in the Indonesian oil palm industry. *Journal of Agricultural Science and Technology*, A4 (2A).
- Purba, R. Y., Sudharto, P., & De-Chenon, R. D. (2001). Result of laboratory and field tests about the attraction of organic matter and its synergy with pheromone on the rhinoceros beetle. Paper presented at *Final Meeting of INCO Project No. ERBIC 18 CT 970 199 17-19 September 2001*, at Marihat, Pematang Siantar.
- Ramlah-Ali, A., Wahid, M. B., & Ramle, M. (1993). Pathogenicity test of *Beauveria bassiana* (Balsamo) against oil palm bagworm (*Metisa plana* Wlk). *Elaeis*, 5(2), 92-101.
- Ramlah, S. A. A., Mohd-Najib, A., Mazmira, M. M., Nor-Shalina, A. T., & Norman, K. (2013). Microbial control for pest and disease and its challenges. In: *Proceeding of Palm Oil International Congress (PIPOC) 2013*, at Kuala Lumpur, Malaysia.
- Ramle, M., Basri, M. W., Norman, K., Ramlah, S. A. A., & Noor-Hisham, H. (2006). Research into the commercialisation of *Metarhizium anisopliae* (Hyphomycetes) for biocontrol of oil palm rhinoceros beetle, *Oryctes rhinoceros* (Scarabaeidae), in oil palm. *Journal of Oil Palm Research, Special Issue*, 37-49.
- Ramle, M., Ramlah, S. A. A., Basri, W. M., & Azura, S. S. I. (1995). *In vitro* studies of *Beauveria bassiana* (Bals.) Vuill. and its infection on bagworm, *Metisa plana* Wlk. In: *Proceeding of PORIM 1993 International Palm Oil Congress*.
- Rozziansha, T. A. P., & Prasetyo, A. E. (2017a). Uji efikasi insektisida Dipel SC terhadap ulat api *Setothosea asigna* Van Eecke pada tanaman kelapa sawit menghasilkan Medan: Pusat Penelitian Kelapa Sawit.
- Rozziansha, T. A. P., & Prasetyo, A. E. (2017b). Uji efikasi insektisida Dipel SC terhadap ulat kantung *Mahasena corbetti* dengan menggunakan *single* dan *double tank fogger* pada tanaman kelapa sawit menghasilkan Medan: Pusat Penelitian Kelapa Sawit.
- Rozziansha, T. A., Priwiratama, P. H., & Susanto, A. (2012). Existing and emerging bagworms in oil palm plantation in Indonesia. In: *Proceeding of the Fourth IOPRI-MPOB International Seminar: Existing and Emerging Pests and Diseases of Oil Palm* at Bandung, Indonesia.
- Rozziansha, T. A. P., Surianto, & Susanto, A. (2013). Application of *Metarhizium anisopliae* using termite baiting system technique as preventive measure for *Coptotermes curvignatus* on peat soil. In: *Proceeding of PIPOC 2013 International Palm Oil Congress: Green opportunities from the golden crop*, 19-21 November 2013, at Kuala Lumpur, Malaysia.
- Rozziansha, T. A. P., & Susanto, A. (2012). Desain ferotrap murah dalam memerangkap kumbang *Oryctes rhinoceros* di perkebunan kelapa sawit. In: *Proceeding of Simposium dan Seminar Nasional Perhimpunan Entomologi Indonesia*, 25 Januari 2012, at Bogor.

- Saleh, A., & Siregar, A. Z. (2017). Impact of natural enemies to leaf eating caterpillar population on oil palm in North Sumatra, Indonesia. *International Jurnal of Scientific & Technology Research*, 6(8), 189-192.
- Sari, R., Guntoro, & Apriyanti, I. (2011). Efektivitas nematoda *Steinernema* sp. terhadap mortalitas larva kumbang tanduk (*Oryctes rhinoceros*). *Jurnal Penelitian STIPAP*, 3(1), 14-29.
- Simanjuntak, D., Prasetyo, A. E., & Susanto, A. (2016). Formulation of Nucleo Polyhedral Virus (NPV)-*Setothosea asigna*. In: *Proceeding of the 6th IOPRI-MPOB International Seminar: Current Research and Management of Pests, Ganoderma, and Pollination in Oil Palm for Higher Productivity*, Medan, Indonesia.
- Simanjuntak, D., & Susanto, A. (2011). Re-propagasi Nucleo Polyhedral Virus (NPV)-*Setothosea asigna*. *Jurnal Penelitian Kelapa Sawit*, 19(2), 1-10.
- Simanjuntak, D., Susanto, A., Prasetyo, A. E., & Sebayang, Y. (2011). Pemanfaatan organic trap sebagai pengendali *Oryctes rhinoceros* secara terpadu di perkebunan kelapa sawit. Paper presented at *Seminar nasional Perhimpunan Entomologi Indonesia 2011, 16-17 Februari 2011*, Universitas Padjajaran, Bandung.
- Sipayung, A. (1991). Hama dan penyakit utama pada perkebunan kelapa sawit dan usaha pengendaliannya. Paper presented at *Pertemuan Teknis PTP V*, at Marihat, Sumatera Utara.
- Sipayung, A., De-Chenon, R. D., & Sudharto, P. (1988). Natural enemies of leaf eating Lepidoptera in the oil palm plantations in North Sumatra. *Biotrop Spec. Publ*, 36, 99-120.
- Sipayung, A., De-Chenon, R. D., & Sudharto, P. (1989). Recent work with viruses in the biological control of leaf-eating caterpillars in North-Sumatra Indonesia. In *PORIM International Oil Palm Development*, 5-9 September, at Kuala Lumpur, Malaysia.
- Sipayung, A., & Sudharto, P. (1985). *Pengujian taraf efikasi Dipel WP (Bacillus thuringiensis Berliner) terhadap ulat api Thosea asigna Moore*. Marihat, Pematang Siantar: Pusat Penelitian Marihat.
- Sitepu, D., Kharie, S., Waroka, J. S., & Motulo, H. F. J. (1988). Methods for the production and use of *Metarhizium anisopliae* against *Oryctes rhinoceros*. In *Integrated Coconut Pest Control Project Report*, 104-111. Manado: Coconut Research Institute.
- Soetopo, D., & Indrayani, I. G. A. A. (2007). Status teknologi dan prospek *Beauveria bassiana* untuk pengendalian serangga hama tanaman perkebunan yang ramah lingkungan. *Perspektif*, 6(2), 29-46.
- Stolz, I. (1999). *The effect of Metarhizium anisopliae (Metsch.) Sorokin (Flavoviridae) Gams and Rozypal var. acridum (Deuteromycotina: Hyphomycetes) on non-target Hymenoptera*. Faculty of Science, University of Basel.
- Sudharto, P., Djamin, A., & Pardede, D. (1997). Pengendalian ulat pemakan daun kelapa sawit secara terpadu. In: *Proceeding of Pertemuan Teknis Kelapa Sawit 1997: Pengendalian Oryctes rhinoceros dan UPDKS secara terpadu*, at Jakarta.
- Sudharto, P., Veyrunes, J. C., Bergoin, M., & Djamin, A. (1995). Virus penyebab penyakit susu (Milky disease) pada ulat api pemakan daun kelapa sawit *Setothosea asigna* Van Eecke (Lepidoptera: Limacodidae) di Indonesia *Jurnal Penelitian Kelapa Sawit*, 3(3), 207-214.
- Susanto, A. (2010). Pengendalian ulat kantong *Metisa plana* secara terpadu pada perkebunan kelapa sawit. In *2010 Research Collaboration Report PPKS-PTP. Nusantara IV*. Medan: Pusat Penelitian Kelapa Sawit.
- Susanto, A., Dongoran, A. P., & Yanti, F. (2007a). The improvement of *Metarhizium anisopliae* to enhance its pathogenicity. In: *Proceeding of PIPOC 2007 International Oil Palm Congress*, at Kuala Lumpur, Malaysia.

- Susanto, A., Dongoran, A. P., Yanti, F., Lubis, A. F., & Prasetyo, A. E. (2006). The role of *Metarhizium anisopliae* on reducing of *Oryctes rhinoceros* larvae in empty fruit bunch of oil palm mulch. In: *Proceeding of the International Oil Palm Conference 2006, 19-23 June*, at Nusa Dua, Bali.
- Susanto, A., Prasetyo, A. E., Prawirosukarto, S., Priwiratama, H., & Rozziansha, T. A. P. (2012a). *Pengendalian Terpadu Oryctes rhinoceros di Perkebunan Kelapa Sawit*. Medan: Pusat Penelitian Kelapa Sawit.
- Susanto, A., Prasetyo, A. E., Simanjuntak, D., Rozziansha, T. A. P., Priwiratama, H., Sudharto, P., De-Chenon, R. D. et al. (2012b). *EWS: Ulat Api, Ulat Kantung, Ulat Bulu*. Medan: Pusat Penelitian Kelapa Sawit.
- Susanto, A., Sudharto, P., & Yanti, F., (2005). *Konservasi dan Perbanyakkan Musuh alami, Hama, Penyakit dan Gulma Kelapa Sawit*: Pusat Penelitian Kelapa Sawit.
- Susanto, A., Utomo, C., Herawan, T., & Dongoran, A. P. (2007b). Peranan feromon agregat sintetik dalam pengurangan populasi kumbang *Oryctes rhinoceros* pada perkebunan kelapa sawit. In: *Proceeding of Seminar Perhimpunan Entomologi Indonesia*, 27 Januari, at Bandung.
- Susanto, A., Utomo, C., Herawan, T., & Sitohang, M. (2012c). Pheromonal ability of octanoate acid in trapping *Oryctes rhinoceros* in oil palm plantation. In: *Proceeding of the International Oil Palm Conference 2010, 1-3 June 2010*, at Yogyakarta.
- Susanto, A., Widayati, W. E., Priwiratama, H., Rozziansha, T. A. P., Simanjuntak, D., & Prasetyo, A. E. (2013). Konsorsium entomopatogen untuk mengendalikan hama di perkebunan kelapa sawit. In: *Proceeding of Pertemuan Teknis Kelapa Sawit*, 7-9 Mei, at Jakarta.
- Suzanti, F., Kuswardani, R. A., Rahayu, S., & Susanto, A. (2016). Diversity of Vascular and Insects Canopy Epiphytes on Palm Oil in North Sumatra, Indonesia. *American Journal of Environmental Protection*, 5(3), 39-49.
- Syed, R. A., & Saleh, H. A. (1998). Integrated pest management of bagworms in oil palm plantation of PT. PP. London Sumatra Indonesia TBK (With particular reference to Mahasena corbetti Tams) in North Sumatra. In: *Proceeding of The International Oil Palm Conference 1998, 23-25 September*, at Nusa Dua, Bali.
- Tajuddin, N. S. A., Ali, S. R. A., Bakeri, S. A., & Kamaruzzaman, K. E. (2010). Effect of *Beauveria brongniartii* and *B. bassiana* on oil palm bagworm, *Pteroma pendula* (Joannis). *Journal of Oil Palm Research*, 22, 729-735.
- Tobing, M. C., Bakti, D., Susanto, A., & Saragih, H. (2007). The use of pheromone trap and net to monitor and control of *Oryctes rhinoceros* (Coleoptera: Scarabaeidae) on oil palm. In: *Proceeding of Kongres VII dan Seminar Nasional Perhimpunan Entomologi Indonesia (PEI)*, 25-27 Juli, at Bali, Indonesia.
- Tulloch, M. (1979). The genus of *Metarhizium*. *Transactions of the British Mycological Society* 66, 407-411.
- Utomo, C., Herawan, T., & Susanto, A. (2006). Mass trapping of *Oryctes rhinoceros* in oil palm by using synthetic pheromone. In: *Proceeding of the International Oil Palm Conference 2006, 21-23 Juni*, at Nusa Dusa, Bali.
- Wibowo, H., Sipayung, A., & De Chenon, R.D. (1994). Teknik perbanyakkan cendawan *Cordyceps* sp. untuk pengendalian *Setothosea asigna* Moore (Lepidoptera : Limacodidae). *Buletin PPKS*, 2, 147-154.
- Witjaksono, W., Wijonarko, A., Harjaka, T., Harahap, I., & Sampurno, W. B. (2015). Tekanan *Metarhizium anisopliae* dan feromon terhadap populasi dan tingkat kerusakan oleh *Oryctes rhinoceros*. *Jurnal Perlindungan Tanaman Indonesia*, 19(2), 73-79.

- Wood, B. J. (1968). *Pests of Oil Palms in Malaysia and their Control*. Kuala Lumpur, Malaysia: Incorporated Society of Planters.
- Wood, B. J. (2002). Pest Control in Malaysia's Perennial Crops: A Half-Century Perspective Tracking the Pathway to Integrated Pest Management. *Integrated Pest Management Reviews*, 7(3), 173.
- Wood, B. J., Corley, R. H. V., & Goh, K. H. (1973). Studies on the effect of pest damage on oil palm yield. In: *Advanced in Oil Palm Cultivation*. In R L Wastrie and D A Earp, 360-279. The Incorporated Society of Planters.
- Yii, J. E., Bong, C. F. J., King, J. H. P., & Kadir, J. (2015). Synergism of entomopathogenic fungus, *Metarhizium anisopliae* incorporated with fipronil against oil palm pest subterranean termite, *Coptotermes curvignathus*. *Plant Protection Science*, 52(1), 35-44.
- Young, E. C., & Longworth, J. P. (1981). The epizootiology of the baculovirus of the coconut palm rhinoceros beetle (*Oryctes rhinoceros*) in Tonga. *Journal of Invertebrate Pathology*, 38(3), 362-369.
- Zelazny, B., & Alfiler, A. R. (1991). Ecology of baculovirus-infected and healthy adults of *Oryctes rhinoceros* (Coleoptera: Scarabaeidae) on coconut palms in the Philippines. *Ecological Entomology*, 16(2), 253-259.
- Zelazny, B., Lolong, A., & Pattang, B. (1992). *Oryctes rhinoceros* (Coleoptera: Scarabaeidae) populations suppressed by a baculovirus. *Journal of Invertebrate Pathology*, 59(1), 61-68.

Perspectiva bioecológica de *Elaeidobius kamerunicus* en relación con el llenado de frutos de palma de aceite en Indonesia*

Bio-ecological Perspective of *Elaeidobius kamerunicus* Related to Oil Palm Fruit Set in Indonesia



AGUS EKO PRASETYO

Instituto de Investigación en Palma de Aceite de Indonesia
Indonesian Oil Palm Research Institute (IOPRI)

AUTORES: Agus Eko Prasetyo, Indonesian Oil Palm Research Institute. Tjut Ahmad Perdana Rozziansha, Indonesian Oil Palm Research Institute. Hari Priwiratama, Indonesian Oil Palm Research Institute. Sri Wening, Indonesian Oil Palm Research Institute. Agus Susanto, Indonesian Oil Palm Research Institute. Roch Desmier de Chenon, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO).

CITACIÓN: Prasetyo, A. E., Perdana-Rozziansha, T. A., Priwiratama, H., Susanto, A., & De-Chenon, R. D. (2019). Perspectiva bioecológica de *Elaeidobius kamerunicus* en relación con el llenado de frutos de palma de aceite en Indonesia. *Palmas*, 40 (Especial Tomo I), 94-110.

PALABRAS CLAVE: *Elaeidobius kamerunicus*, bioecología, fruit set, técnica de incubación, transporte.

KEYWORDS: *Elaeidobius kamerunicus*, bioecology, fruit set, incubation technique, transport.

*Artículo original recibido en inglés y traducido por Carlos Arenas París.

Resumen

Desde su introducción a comienzos de 1983, *Elaeidobius kamerunicus* se ha convertido en el principal polinizador de la palma de aceite en Indonesia, siendo uno de los descubrimientos que impulsó el rápido desarrollo de la siembra de palma de aceite en los 90, que al día de hoy se ha expandido significativamente a más de 14 millones hectáreas en ese país. Luego de 30 años de su introducción, la población y agresividad de *E. kamerunicus* en algunas regiones ha disminuido, ocasionando una reducción en las cifras de productividad en las plantaciones afectadas. Por ello, en los últimos años se han venido adelantando varias investigaciones sobre la bioecología de *E. kamerunicus*. Respecto a los resultados, las técnicas de incubación y transporte, así como Kairomix, fueron diseñadas para aumentar la población y la agresividad del gorgojo a fin de minimizar el problema de formación de

fruit set en las plantaciones de palma de aceite. Adicionalmente, varias investigaciones han mostrado que la presencia de enemigos naturales, la aplicación de insecticidas, factores climáticos (temperatura, pluviosidad y periodos de sequía) y la ubicación geográfica de los cultivos son factores que afectan las dinámicas poblacionales de *E. kamerunicus*. Por otro lado, estudios sobre el comportamiento del gorgojo han demostrado que la hembra juega un papel importante en la determinación de la formación del *fruit set* de la palma de aceite. Actualmente, los investigadores son conscientes de la posibilidad de introducir otras especies, tales como *E. plagiatus* y *E. subvittatus*, con el objetivo de mantener las tasas de formación de *fruit set* en los cultivos de palma.

Abstract

Since introduced in the early 1983, *Elaeidobius kamerunicus* has becoming the main oil palm pollinator in Indonesia. It was one of the triggers of the rapid development of oil palm plantation in the 1990s, which has significantly expanded to more than 14 million hectares to date. Thirty years after introduction, the population and aggressiveness of *E. kamerunicus* in some regions have declined and thus caused low fruit set value in affected plantations. Ever since, various researches on the bio-ecology of *E. kamerunicus* had been carried out, particularly those related to the fruit set. As the results, hatch-carry technique and Kairomix were invented to increase the population as well as the aggressiveness of the weevil to minimize the fruit set problem. In addition, several researches showed that the population dynamics of *E. kamerunicus* was influenced by the presence of natural enemies, the use of pesticides, climatic factors (temperature, rainfall, and dry periods) and geo-location. On the other hand, research on the behavior of *E. kamerunicus* had demonstrated that the female weevil plays a major role in determining the oil palm fruit set. Researchers are now aware on the possibility to introduce another species such as *E. subvittatus* to maintain high oil palm fruit set.

Introducción

La palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) es el cultivo más importante en Indonesia, convirtiéndose en la mayor fuente de ingresos de moneda extranjera, superando el carbón y el petróleo (BPS, 2017). Actualmente, el área total de plantaciones de palma de aceite en este país es de más de 14 millones de hectáreas, lo que representa una producción de 37 millones de toneladas de aceite de palma crudo (Ditjenbun, 2017).

El rápido desarrollo de la agroindustria en Indonesia comenzó con la introducción del insecto polinizador de la palma de aceite, *Elaeidobius kamerunicus* Faust, desde África Occidental, en 1983 (Susanto *et al.*, 2007). Antes de esto, la polinización ocurría naturalmente por el viento e insectos nativos, como *Thrips hawaiiensis* o *Pyroderces* sp., resultando en racimos con un bajo llenado de frutos, con menos del 45 % de frutos desarrollados. Por lo tanto, la po-

linización asistida por humanos era necesaria para aumentarlo a un rango aceptable, particularmente durante los primeros cinco años de la maduración (De-Chenon, 2016). Después del éxito en Malasia, en 1982 finalmente se introdujo *E. kamerunicus* a Indonesia. Luego de una serie de evaluaciones del rango del hospedador (Hutauruk *et al.*, 1982), en 1983 se liberaron gorgojos polinizadores en varias plantaciones de Sumatra Septentrional.

Un año después de su introducción, la presencia de *E. kamerunicus* aumentó efectivamente el llenado de frutos de la palma de aceite entre 39 % y 80 % (De-Chenon, 2016). Desde entonces, se ha convertido en el principal polinizador de palma de aceite, evitando la necesidad de las costosas polinizaciones asistidas por el hombre (Sipayung & Lubis, 1987). En poco tiempo, se resolvió el problema y, por lo tanto, el estudio de *E. kamerunicus* se ha descuidado gradualmente. En la última década, sin embargo, ha habido

una reducción en el rendimiento de la palma de aceite en muchas plantaciones de Indonesia y, nuevamente, se sospecha que el problema de la polinización es uno de los factores que ha contribuido a esto (Prasetyo & Susanto, 2012a). Así se indicó a raíz de la ocurrencia de los llamados “buah landak” (“racimos espinosos”), un RFF con un llenado de frutos menor al 20 % a lo largo de Indonesia, especialmente en palmas maduras tempranas (Purba *et al.* 2016). Además del clima y la fisiología de la inflorescencia, la población y agresividad de los gorgojos *E. kamerunicus* son los factores que, sin duda, están afectando el desarrollo del llenado de frutos (Harahap *et al.*, 2013). Ahora, muchos investigadores se están concentrando en la bioecología de *E. kamerunicus* como uno de los enfoques para volver a la era dorada de la polinización natural.

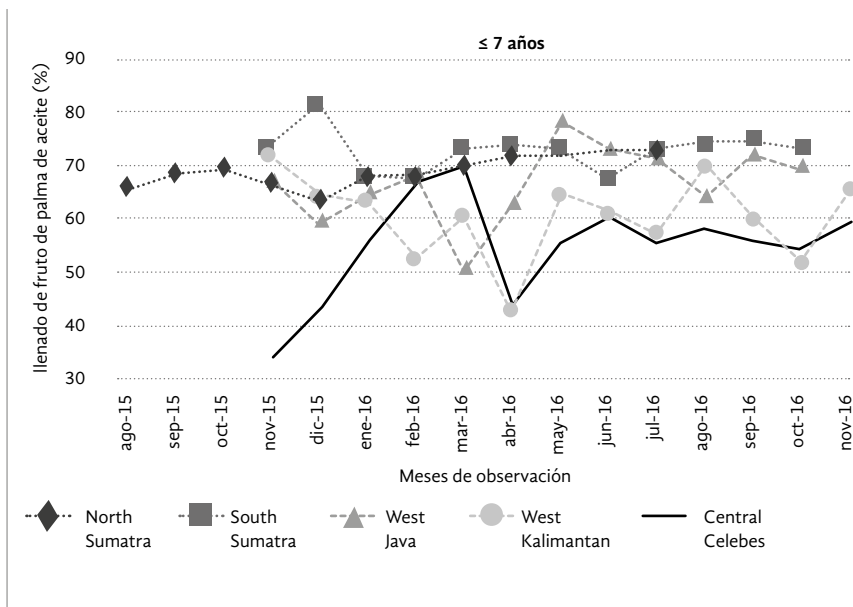
Dinámicas del llenado de frutos de palma de aceite en Indonesia

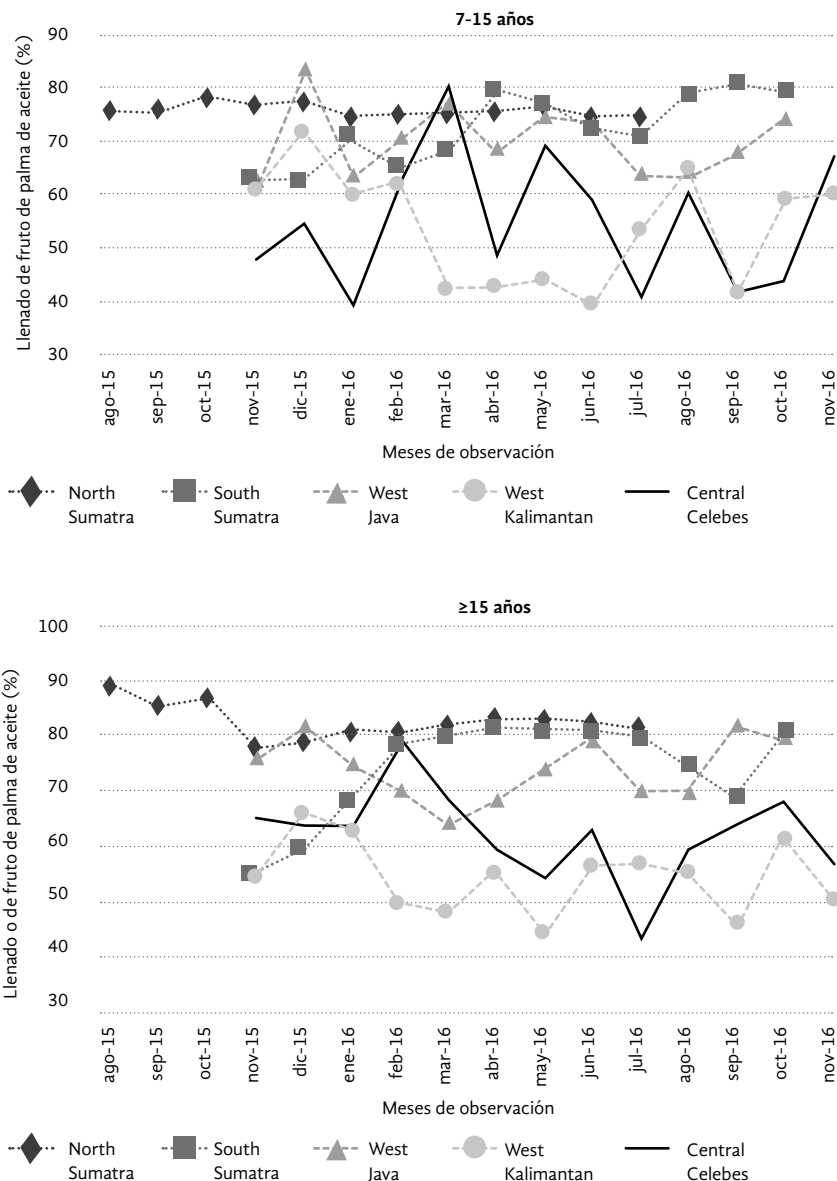
Indonesia es un país archipiélago con condiciones climáticas altamente diversas que afectan el desarrollo de *E. kamerunicus*. Por consiguiente, el valor del llenado de frutos puede variar entre plantaciones dependiendo de la agresividad del gorgojo polinizador en la región. Con base en nuestros registros de un censo de un año, el llenado de frutos suele ser más alto en Sumatra en comparación con Java, Célebes y

Borneo (Figura 1). Esto puede deberse a que las condiciones climáticas en Sumatra son más apropiadas para el desarrollo y agresividad del gorgojo.

Nuevas plantaciones de palma de aceite en Borneo y la Isla de Célebes están establecidas principalmente en tierras marginales, incluyendo tierras con suelo arenoso, turba y antiguas zonas de minería, lo que podría influir en la condición de *E. kamerunicus* (Subardja *et al.*, 2006). Un estudio reciente realizado en Borneo Central mostró que la palma de aceite en las áreas de turba y suelo arenoso tenían un menor valor de llenado de frutos en comparación con las plantadas en suelo mineral y que existía una correlación positiva con la baja población de *E. kamerunicus* en esas dos áreas (Lubis *et al.*, 2017). Otro factor que contribuye directamente a la baja población del gorgojo polinizador es el daño en la flor masculina después de la antesis debido al ataque de ratas (Purba *et al.*, 2013; Prasetyo y Susanto, 2014; Purba *et al.*, 2016). A pesar de la alta población de *E. kamerunicus* en Borneo, el bajo llenado de frutos continúa siendo un problema. Es probable que este esté relacionado con una reducción en la agresividad del gorgojo allí, en comparación con una disminución mucho menor en Sumatra Septentrional (Prasetyo & Susanto, 2012b; Prasetyo & Susanto, 2014; Lubis *et al.*, 2017).

Figura 1. Dinámicas del llenado de frutos de la palma de aceite en varias regiones de Sumatra, Java, Borneo y Célebes.





Continuación Figura 1. Dinámicas del llenado de frutos de la palma de aceite en varias regiones de Sumatra, Java, Borneo y Célebes.

Hoy en día, las plantaciones de palma de aceite se han expandido a varias islas en las que nunca antes se había plantado palma de aceite, como Ceram y Halmahera, donde se establecieron sin la posterior introducción del gorgojo polinizador, por lo que el llenado de frutos era muy bajo (entre 0,5 y 30 %). En 2013 y 2017, el Indonesian Oil Palm Research Institute (IOPRI) introdujo *E. kamerunicus* de Sumatra Septentrional a la Isla de Ceram y la Isla de Halmahera, respectivamente (Prasetyo y Susanto, 2016; Prasetyo *et al.*, 2018a). Desde entonces, el llenado de frutos ha aumentado a 50-75 %, indicando el papel esencial del gorgojo para el desarrollo de este cultivo.

Impacto de la aplicación de insecticida sobre el gorgojo polinizador

La aplicación no controlada de insecticida puede reducir la población de *E. kamerunicus* significativamente (Hutauruk *et al.*, 1985; Purba *et al.*, 2010). En una prueba de campo, varios insecticidas, tales como deltametrin, fipronil, acefato, lambda cihalotrin, clo-rantraniliprol, flubendiamida y *Bacillus thuringiensis*, fueron rociados directamente a inflorescencias masculinas en antesis con el fin de observar sus efectos sobre *E. kamerunicus*. El resultado mostró que todos,

excepto clorrantraniliprol y flubendiamida, tenían un efecto adverso en las visitas del gorgojo a las inflorescencias. Dichas visitas se alteraron con la aspersión de los cinco insecticidas y comenzaron a recuperarse solo dos días después de la aplicación (Figura 2). En contraste, la actividad de alimentación y reproducción del gorgojo no se vio afectada por *B. thuringiensis*, así como por clorrantraniliprol y flubendiamida, que fueron posteriormente clasificados como insecticidas de etiqueta verde. Esta investigación ilustra la necesidad de insecticidas selectivos en el control de las plagas de insectos en la palma de aceite.

Paralelamente, se realizaron ensayos in vivo con estos insecticidas. El resultado de las pruebas de campo con aspersión directa, particularmente deltametrin y fipronil, causó la muerte a *E. kamerunicus* pocos minutos después de la aplicación (Prasetyo *et al.*, 2013). En otros estudios, la mortalidad del gorgojo fue hasta del 100 % con la aplicación de metrifonato (Kok *et al.* 2010) y de menos del 100 % con tiociclam oxalato hidrógeno (Tuo *et al.*, 2011a), imidacloprid

(Hambal, 2009) e indoxacarb (Kok *et al.*, 2010). En contraste, *B. thuringiensis* no fue letal para el *E. kamerunicus* (Ahmad *et al.*, 2009, 2012; Prasetyo *et al.*, 2013). Los insecticidas sintéticos considerados como seguros para *E. kamerunicus* fueron solo clorrantraniliprol (Kok *et al.*, 2010; Prasetyo *et al.*, 2013), flubendiamida (Prasetyo *et al.*, 2015a) y TMOF (Omar, 2011). Sin embargo, una reducción de hasta el 30 % en la población del gorgojo no influye en la polinización natural en el campo (Omar, 2011).

Si un insecticida causa o no una reducción significativa en la población del gorgojo depende del momento de su aplicación. Para verificarlo, contamos el número de gorgojos que emergen de inflorescencias masculinas tratadas con insecticidas 21 días después de la exposición. Los resultados mostraron que la aplicación entre el primer y el tercer día de la antesis causa un número significativamente inferior de gorgojos emergiendo de las inflorescencias tratadas, en comparación con las que fueron rociadas en el cuarto día de la antesis (Figura 3).

Figura 2. Visitas de *E. kamerunicus* a inflorescencia masculina en antesis después de la aplicación de insecticida.

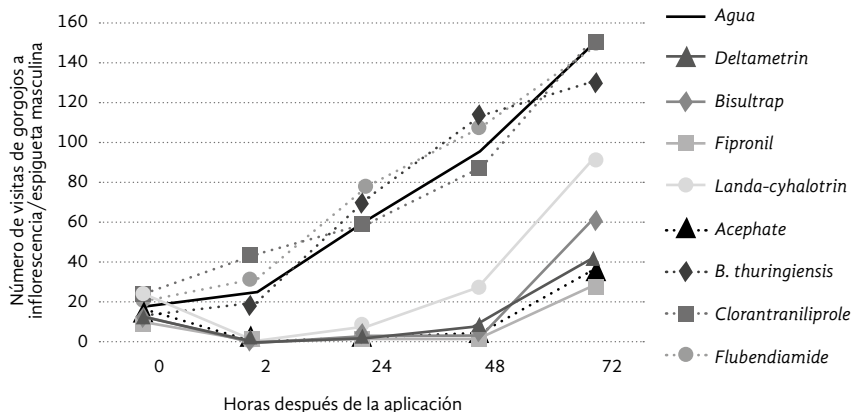
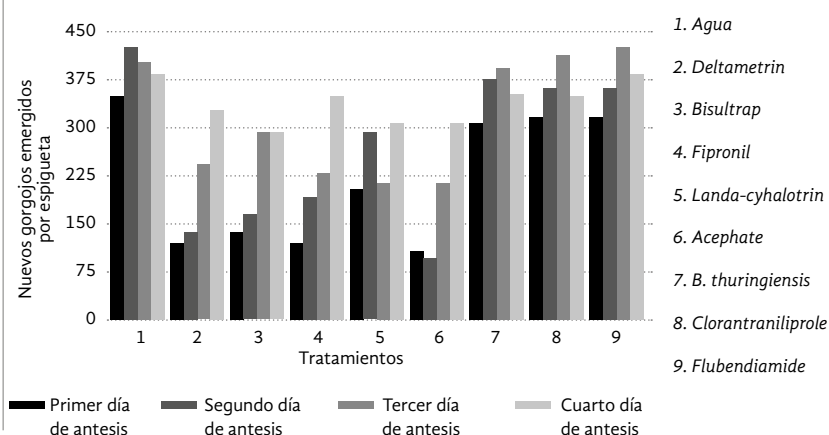


Figura 3. Emergencia de una nueva generación de gorgojos *E. kamerunicus* de espigueta masculina 21 días después de la exposición al insecticida.



En otra ocasión, realizamos una prueba de campo para observar la dinámica poblacional de *E. kamerunicus* bajo la aplicación frecuente de insecticida. Esta se llevó a cabo en intervalos de dos semanas durante nueve meses, en las que se observó una reducción significativa en la población de gorgojos y en las visitas a inflorescencias masculinas y femeninas durante el periodo de aplicación del insecticida, particularmente en bloques en los que se utilizó el sintético (Prasetyo & De-Chenon, 2018). En contraste, la población y actividad de *E. kamerunicus* no se vio afectada por la aplicación de *B. thuringiensis*. En consecuencia, el valor del llenado de frutos, el peso del racimo y el rendimiento de los RFF en bloques con aplicación de insecticida sintético fue menor en comparación con los que se usó *B. thuringiensis*.

Reducción en la agresividad del gorgojo polinizador

Pruebas anteriores in vivo mostraron que *E. kamerunicus* de Sumatra Septentrional era más agresivo al visitar flores femeninas en comparación con el de Borneo Central (Prasetyo y Susanto, 2012b). Con el fin de lograr un llenado de frutos del 75 %, se requieren al menos 144.000 gorgojos/hectárea en Borneo (Prasetyo & Susanto, 2012b), siete veces más que en Sumatra Septentrional. El resultado de la observación de campo concuerda con el ensayo in vivo (Prasetyo *et al.*, 2015b). Se hicieron esfuerzos para aumentar la agresividad del gorgojo en Borneo introduciendo *E. kamerunicus* de Sumatra Septentrional para que se aparearan entre sí

y, quizás, produjeran una nueva generación que fuera más agresiva. El llenado de frutos aumentó entre 5 y 16 % siete meses después de la introducción, pero volvió a reducirse tres meses después.

En 2015, cuando la niebla producida por incendios afectó muchas plantaciones en Sumatra y en Borneo durante un largo periodo, identificamos una reducción en la actividad de los gorgojos en las plantaciones afectadas (Prasetyo *et al.* 2016). La observación en campo mostró que las visitas a flores femeninas receptoras disminuían significativamente durante el periodo de la niebla, a pesar de tener una actividad normal en la flor masculina en antesis (Figura 4). Se demostró así el efecto adverso que la niebla ocasionada por los incendios tiene en las actividades de *E. kamerunicus*, que interrumpió aún más la polinización. Según lo esperado, el llenado de frutos en las plantaciones afectadas se redujo seis meses después del desastre; por ejemplo, se observó una disminución del 18,79 % en Borneo Central (Prasetyo *et al.*, 2016).

Biología del gorgojo polinizador 30 años después de su introducción

Consideramos que la reducción en los gorgojos de *E. kamerunicus* se debe a una depresión endogámica. En junio de 1980 se seleccionaron aproximadamente 2,000 pupas para ser transportadas de Camerún a Malasia. En Kuala Lumpur, este número se redujo a 1,044 y, después de una serie de procedimientos de crianza, solo 400 se desarrollaron con éxito en imago. Estos gorgojos fueron liberados en

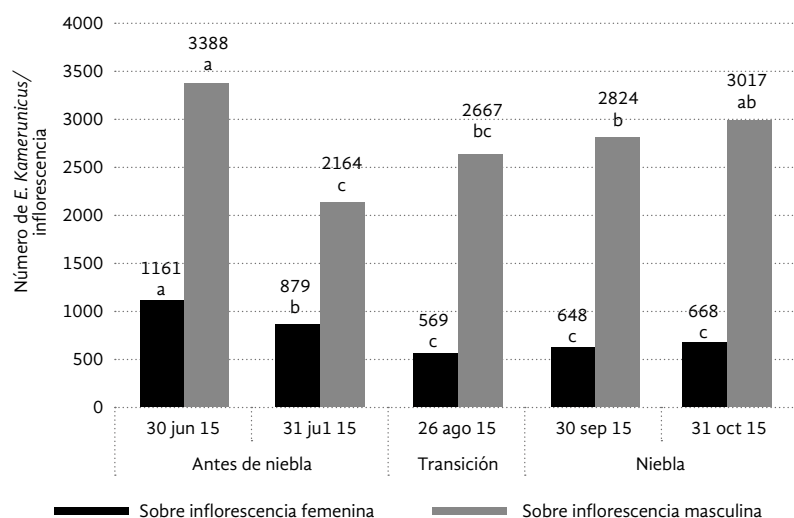


Figura 4. Número de gorgojos de *E. kamerunicus* en inflorescencias masculinas en antesis y femeninas receptoras (la misma letra bajo un número en la parte superior de la gráfica con polígonos del mismo control no muestra una diferencia mínima significativa con un nivel de confianza del 95 %).

dos sitios diferentes: en Malasia peninsular en febrero de 1981 y en Sabah un mes después (De-Chenon, 2016). Según Syed (1982) y Tuo *et al.* (2011b), *E. kamerunicus* completa su ciclo de vida en menos de dos semanas, lo que significa que el gorgojo actual en Malasia e Indonesia es la generación 1,000+, originada de los 400 gorgojos introducidos. Adicionalmente, se realizó un estudio sobre la biología de *E. kamerunicus* en dos sitios con una elevación distinta en Sumatra Septentrional: tierras bajas (< 200 msnm) y tierras altas (>800 msnm) (Rozziansha & Prasetyo, 2017). En total, el ciclo de vida de *E. kamerunicus* fue más largo en las tierras altas, aunque

la esperanza de vida del imago es más corta que en las tierras bajas (Tabla 1). Este último tiene un ciclo de vida similar al de África.

Con el fin de verificar si hay variaciones en la morfología del gorgojo 30 años después de su introducción en Indonesia, recolectamos muestras de 17 regiones esparcidas por las islas de Sumatra, Java, Borneo, Célebes y Papúa para ser analizadas. Medimos varios parámetros, incluyendo la dimensión (largo y ancho) del cuerpo, tórax, abdomen, cabeza y rostro. Los resultados evidenciaron variaciones morfológicas significativas en machos y hembras (Tabla 2 y 3).

Tabla 1. Ciclo de vida de *E. kamerunicus* en las tierras bajas y altas de Sumatra Septentrional, Fuente: Tuo *et al.* (2011b).

| Etapas | Esperanza de vida de <i>Elaeidobius kamerunicus</i> (días) | | |
|----------------|--|------------------|---------------|
| | En tierras bajas | En tierras altas | En África |
| Huevo | 1,01 ± 0,02 | 2,50 ± 0,05 | 0,58 ± 0,06 |
| Larva fase 1 | 1,05 ± 0,09 | 2,50 ± 0,06 | 1,24 ± 0,12 |
| Larva fase 2 | 1,06 ± 0,11 | 5,02 ± 0,03 | 1,08 ± 0,10 |
| Larva fase 3 | 4,82 ± 1,96 | 8,50 ± 0,12 | 4,96 ± 0,11 |
| Pupa | 2,35 ± 0,45 | 10,05 ± 0,03 | 2,03 ± 0,03 |
| Imago (macho) | 52,53 ± 5,82 | 10,78 ± 2,36 | 27,96 ± 2,99 |
| Imago (hembra) | 37,87 ± 4,79 | 15,72 ± 3,83 | 31,22 ± 12,43 |

Tabla 2. Parámetro morfológico de gorgojo de *E. kamerunicus* macho originario de 17 provincias de Indonesia.

| Provincia | Morfología del gorgojo macho (mm) | | | | | | | | |
|-----------------------|-----------------------------------|--------------|----------------|-------------|------------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|
| | Longitud cuerpo | Ancho cuerpo | Longitud tórax | Ancho tórax | Longitud abdomen | Longitud cabeza | Ancho cabeza | Longitud rostro | Ancho rostro |
| Aceh | 3,98 gh | 1,51 def | 0,89 d | 1,16 bc | 1,16 bc | 0,29 de | 0,54 efgh | 1,06 de | 0,24 f |
| Sumatra Septentrional | 3,84 fg | 1,53 f | 0,89 cd | 1,22 de | 1,22 de | 0,32 e | 0,56 i | 0,99 bcd | 0,23 cdef |
| Riau | 3,52 bcd | 1,39 a | 0,83 abcd | 1,24 def | 1,24 def | 0,17 a | 0,52 bcde | 0,96 abc | 0,22 bcd |
| Sumatra Occidental | 3,40 ab | 1,37 a | 0,81 ab | 1,22 de | 1,22 de | 0,22 b | 0,53 defg | 0,93 abc | 0,20 a |
| Bengkulu | 3,31 a | 1,38 a | 0,77 a | 1,08 a | 1,08 a | 0,26 cd | 0,49 a | 0,91 a | 0,23 cdef |
| Sumatra Meridional | 3,58 cd | 1,47 bcde | 0,85 abcd | 1,08 a | 1,08 a | 0,30 e | 0,51 abcd | 0,95 abc | 0,23 cdef |
| Bangka-Belitung | 3,90 fg | 1,46 bc | 0,89 d | 1,29 gh | 1,28 gh | 0,20 ab | 0,52 bcde | 0,95 abc | 0,21 bc |

Continúa →

Continuación Tabla 2. Parámetro morfológico de gorgojo de *E. kamerunicus* macho originario de 17 provincias de Indonesia.

| Provincia | Morfología del gorgojo macho (mm) | | | | | | | | |
|---------------------|-----------------------------------|--------------|----------------|-------------|------------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|
| | Longitud cuerpo | Ancho cuerpo | Longitud tórax | Ancho tórax | Longitud abdomen | Longitud cabeza | Ancho cabeza | Longitud rostro | Ancho rostro |
| Lampung | 4,09 h | 1,51 ef | 0,84 abcd | 1,31 hi | 1,31 hi | 0,17 a | 0,55 ghi | 0,99 cd | 0,23 ef |
| Bantén | 3,40 ab | 1,37 a | 0,82 abcd | 1,19 cd | 1,19 cd | 0,19 ab | 0,49 a | 0,94 abc | 0,19 a |
| Java Occidental | 3,50 bc | 1,38 a | 0,81 abc | 1,22 de | 1,22 de | 0,19 ab | 0,51 bc | 1,04 de | 0,21 ab |
| Borneo Occidental | 3,84 fg | 1,48 bcde | 0,88 bcd | 1,33 i | 1,33 i | 0,19 ab | 0,55 hi | 1,06 de | 0,23 cdef |
| Borneo Central | 3,66 de | 1,44 b | 0,86 bcd | 1,28 fgh | 1,28 fgh | 0,19 ab | 0,54 fgh | 1,07 e | 0,23 def |
| Borneo Oriental | 3,63 cd | 1,45 b | 0,84 abcd | 1,25 efg | 1,25 efg | 0,19 ab | 0,54 efg | 0,99 cd | 0,22 bcd |
| Borneo Meridional | 3,86 fg | 1,49 cdef | 0,85 bcd | 1,13 b | 1,13 b | 0,26 cd | 0,51 abcd | 0,94 abc | 0,23 cdef |
| Célebes Central | 3,60 cd | 1,40 a | 0,85 abcd | 1,24 def | 1,24 def | 0,20 ab | 0,53 cdef | 1,00 cd | 0,21 ab |
| Célebes Suroriental | 3,77 ef | 1,47 bcd | 0,85 bcd | 1,25 efg | 1,25 efg | 0,23 bc | 0,53 cdef | 0,92 ab | 0,23 cdef |
| Papúa | 3,87 fg | 1,40 a | 0,86 bcd | 1,13 b | 1,14 b | 0,28 de | 0,52 bcde | 0,94 abc | 0,24 f |

Nota: las letras debajo de cada número muestran una diferencia significativa entre los tratamientos con el test de Duncan con un nivel de significación del 95 %.

Tabla 3. Parámetro morfológico de gorgojo de *E. kamerunicus* hembra originario de 17 provincias de Indonesia.

| Provincia | Morfología del gorgojo hembra (mm) | | | | | | | | |
|-----------------------|------------------------------------|--------------|----------------|-------------|------------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|
| | Longitud cuerpo | Ancho cuerpo | Longitud tórax | Ancho tórax | Longitud abdomen | Longitud cabeza | Ancho cabeza | Longitud rostro | Ancho rostro |
| Aceh | 3,52 afgh | 1,29 ef | 0,75 def | 1,02 bcd | 2,01 d | 0,25 de | 0,52 d | 1,36 f | 0,19 ab |
| Sumatra Septentrional | 3,19 bc | 1,36 g | 0,76 ef | 0,97 abc | 2,13 e | 0,28 e | 0,52 d | 1,48 g | 0,20 bc |
| Riau | 3,28 bcd | 1,18 a | 0,67 a | 1,01 bcd | 1,81 ab | 0,20 abcd | 0,49 b | 1,19 ab | 0,17 ab |
| Sumatra Occidental | 3,26 bcd | 1,24 bcd | 0,72 abcde | 1,02 bcde | 1,86 abc | 0,19 abcd | 0,51 cd | 1,34 ef | 0,18 ab |
| Bengkulu | 2,88 a | 1,19 ab | 0,68 ab | 0,91 a | 1,86 abc | 0,19 abcd | 0,46 a | 1,15 a | 0,19 ab |
| Sumatra Meridional | 3,35 cde | 1,24 cde | 0,71 abcde | 0,90 a | 1,84 abc | 0,04 bcd | 0,45 a | 1,31 def | 0,19 ab |
| Bangka-Belitung | 3,55 fghi | 1,20 abc | 0,69 abc | 1,00 bcd | 1,83 abc | 0,23 bcde | 0,45 a | 1,19 ab | 0,17 a |
| Lampung | 3,70 i | 1,26 de | 0,71 abcd | 1,10 e | 1,90 bc | 0,14 a | 0,50 bcd | 1,25 bcd | 0,18 ab |

Continúa →

Continuación Tabla 3. Parámetro morfológico de gorgojo de *E. kamerunicus* hembra originario de 17 provincias de Indonesia.

| Provincia | Morfología del gorgojo hembra (mm) | | | | | | | | |
|---------------------|------------------------------------|--------------|----------------|-------------|------------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|
| | Longitud cuerpo | Ancho cuerpo | Longitud tórax | Ancho tórax | Longitud abdomen | Longitud cabeza | Ancho cabeza | Longitud rostro | Ancho rostro |
| Bantén | 3,34 cde | 1,19 abc | 0,74 cdef | 0,97 abc | 1,86 abc | 0,15 a | 0,48 b | 1,27 d | 0,17 a |
| Java Occidental | 3,37 cde | 1,21 abcd | 0,70 abcd | 0,99 bcd | 1,77 a | 0,16 ab | 0,49 bc | 1,29 de | 0,17 a |
| Borneo Occidental | 3,51 efg | 1,24 bcd | 0,72 abcde | 1,07 de | 1,91 bc | 0,18 ab | 0,50 bcd | 1,28 de | 0,23 d |
| Borneo Central | 3,37 cde | 1,25 cde | 0,73 abcdef | 1,05 cde | 1.93 cd | 0,17 ab | 0,52 d | 1,31 def | 0,22 cd |
| Borneo Oriental | 3,25 bcd | 1,21 abcd | 0,73 bcdef | 1,01 bcd | 1,84 abc | 0,15 a | 0,50 bcd | 1,31 def | 0,18 ab |
| Borneo Meridional | 3,68 gi | 1,31 f | 0,74 bcdef | 0,96 ab | 1,92 cd | 0,19 abcd | 0,49 bc | 1,31 def | 0,19 ab |
| Célebes Central | 3,14 b | 1,19 ab | 0,77 f | 1,07 de | 1,84 abc | 0,19 abc | 0,48 b | 1,27 d | 0,17 ab |
| Célebes Suroriental | 3,33 cde | 1,21 abcd | 0,70 abc | 1,01 bcd | 1,85 abc | 0,18 ab | 0,49 bc | 1,20 abc | 0,17 ab |
| Papúa | 3,40 def | 1,26 de | 0,73 bcdef | 0,91 a | 1,93 cd | 0,25 cde | 0,49 bc | 1,26 cd | 0,19 ab |

Nota: las letras debajo de cada número muestran una diferencia significativa entre los tratamientos con el test de Duncan con un nivel de significación del 95 %.

Prasetyo & Susanto (2014) reportaron la posibilidad de diversidad genérica en especímenes de *E. kamerunicus* de regiones de Indonesia extrayendo el ADN genómico de 65 especies y siguiendo el método optimizado descrito por Wening *et al.* (2016) para realizar más análisis de ADN. Posteriormente, aplicaron la técnica de polimorfismos en la longitud de fragmentos amplificados (AFLP, por sus siglas en inglés) con un protocolo modificado por Vos *et al.* (1995) según lo descrito en Ningrum *et al.* (2014), utilizando seis combinaciones de partidores. Se construyó un análisis usando UPGMA, agrupamiento pareado no ponderado con media aritmética por MEGA, versión 6 (Tamura *et al.* 2013).

En general, se agruparon los gorgojos en dos grupos, independientemente de la región en la que fueron recolectados. El grupo utilizado para la caracterización de ADN no fue diferenciado entre macho y hembra. Por lo tanto, no se consideró la diferencia

característica que puede existir entre estos, aunque potencialmente podría influir en el resultado. Se continuará, entonces, el estudio sobre la caracterización molecular de *E. kamerunicus*. También se realizó la caracterización de *E. kamerunicus* de diferentes áreas en Sumatra Septentrional (Prasetyo *et al.* 2017) utilizando un protocolo similar al del estudio anterior.

La función de *E. kamerunicus* como polinizador de la palma

Hemos abordado las diferencias en las características morfológicas entre el *E. kamerunicus* macho y hembra. El macho tiene un tamaño mayor (Tablas 2 y 3) y posee un cuerpo peludo que les permite llevar más polen (Dhilleepan, 1992); este es capaz de transportar 698 granos polen, mientras que la hembra solo 293 (Permana *et al.* 2017). A pesar de esto, el número de gorgojos hembra que visitan inflorescencias femeni-

nas receptivas es entre dos y cuatro veces mayor que el del macho (Prasetyo y Susanto, 2012a), Esto podría ser un indicio de que la función del gorgojo hembra en polinizaciones lo supera,

Para demostrarlo, realizamos un estudio sobre los efectos de diferentes composiciones de gorgojos en el llenado de frutos de la palma de aceite. Nueve inflorescencias femeninas receptivas fueron tratadas con la liberación de: i) 250 gorgojos macho/inflorescencias, ii) 250 gorgojos hembra/inflorescencias, y iii) 125 gorgojos macho y hembra por inflorescencia. Antes de su liberación, se les roció un polen altamente viable (>80 %). Cinco meses después, se contó el llenado de frutos de racimos desarrollados utilizando un método de nueve cuadrantes, Las espiguetas fueron removidas del pedúnculo y se agruparon con base en la posición del racimo: parte superior, media y basal, Posteriormente, se hizo lo mismo con los frutos de los pedúnculos y, una vez más, se agruparon con base en su posición: fruto externo, medio e interior. Por último, se contó el número de frutos desarrollados y partenocárpicos.

En general, el llenado de frutos más alto se desarrolló en la parte externa del racimo, mientras que en la parte interior tuvo el menor valor. Todos los racimos que fueron polinizados únicamente por gorgojos hembra presentaron el mayor valor de llenado de frutos en cada sección del racimo (Tabla 4), Sorprendentemente, el de las partes interiores superó las expectativas, indicando que la hembra se mueve activamente hacia la región interior del racimo, La razón aún no es clara.

El peso total del racimo coincide con el valor del llenado de frutos. Tal y como se esperaba, los racimos tratados con gorgojos hembra tenían el mayor peso, seguido de los racimos tratados con gorgojos macho y hembra (Tabla 5). El menor peso del racimo en los tratados con machos se debe principalmente a frutos menos desarrollados, particularmente en la región interna y la parte basal del mismo. Los resultados sugieren que la hembra de *E. kamerunicus* juega un mayor papel en el llenado de frutos de la palma de aceite (Prasetyo & De-Chenon, 2018).

Tabla 4. El llenado de frutos promedio en diferentes partes del racimo de la palma de aceite polinizado con gorgojos macho y hembra.

| Tratamiento (gorgojos) | | Llenado de frutos en nueve cuadrantes (%) | | | | | | | | |
|------------------------|--------|---|-------------|----------------|-----------------|-------------|----------------|-----------------|-------------|----------------|
| | | Pedúnculo superior | | | Pedúnculo medio | | | Pedúnculo basal | | |
| Macho | Hembra | Fruto externo | Fruto medio | Fruto interior | Fruto externo | Fruto medio | Fruto interior | Fruto externo | Fruto medio | Fruto interior |
| 250 | 0 | 61,39 | 38,14 | 10,33 | 74,59 | 47,24 | 17,70 | 67,05 | 28,81 | 13,23 |
| 0 | 250 | 79,06 | 85,42 | 74,62 | 85,64 | 78,71 | 73,63 | 92,89 | 87,19 | 62,77 |
| 125 | 125 | 75,93 | 56,17 | 49,85 | 68,43 | 68,33 | 74,86 | 63,33 | 72,00 | 53,44 |
| 0 | 0 | 0,12 | 0,07 | 0,08 | 0,05 | 0,11 | 0,06 | 0,07 | 0,01 | 0,02 |

Tabla 5. Llenado de frutos promedio, frutos por racimo y peso del racimo de palma de aceite tratados con gorgojos macho y hembra.

| Tratamiento (gorgojos) | | Llenado de frutos | Frutos por racimo | Peso del racimo |
|------------------------|--------|-------------------|-------------------|-----------------|
| Macho | Hembra | % | % | kg |
| 250 | 0 | 41,01 c | 43,60 c | 17,37 c |
| 0 | 250 | 78,97 a | 61,28 a | 23,62 a |
| 125 | 125 | 64,92 b | 56,67 b | 21,44 b |
| 0 | 0 | 0,06 d | 0,02 d | 6,25 d |

Nota: las diferentes letras en la misma columna muestran una diferencia significativa entre los tratamientos con el test de Duncan con un nivel de significación del 95 %.

Visitas de *E. kamerunicus* a flores masculinas y femeninas de varios germoplasmas de palma de aceite

De las dos especies de palma de aceite, *E. guineensis* es la única que se siembra comercialmente en Indonesia. La otra, *E. oleifera*, no se ha comercializado a pesar de la calidad superior del aceite y su resistencia a las enfermedades. Sin embargo, *E. oleifera* ha sido una parte integral de los programas de reproducción para mejorar la calidad del aceite y la resistencia de los materiales de siembra recientes en Indonesia (Purba *et al.*, 2009). Varias progenies que resultaron del programa han sido sembradas en el campo y ahora están floreciendo. La investigación de campo sobre la visita de *E. kamerunicus* a flores masculinas y femeninas se realizó en ocho germoplasmas de palma de aceite, incluyendo *E. oleifera* y sus retrocruzamientos.

Los resultados mostraron que la palma de aceite *E. guineensis* es altamente atractiva para *E. kamerunicus*, según lo indica una mayor visita del gorgojo (Figuras 6 y 7). Entre tanto, en el material de siembra resultante del segundo retrocruzamiento *E. guineensis* x *E. oleifera* (BC-2), así como en el clon del primer retrocruzamiento E,o x E,g (BC-1), la presencia de *E. kamerunicus* es menor que en el cruzamiento *E. guineensis*, demostrando que estos materiales son menos atractivos para el gorgojo. En contraste, no se observaron acercamientos de *E. kamerunicus* a las flores masculinas y femeninas de *E. oleifera*. Las mayores visitas de gorgojos a las flores masculinas en inflorescencia se dieron en la palma de aceite de Angola, pero no sobre su flor femenina receptiva (Figura 7). En esta última, fueron mayores en el cruce DxP y DxT de *E. guineensis* respecto a BC-1 y BC-2, por lo que quizás las menores visitas de gorgojos se deben a que las progenies continúan heredando varias de las característi-

Figura 6. Número de gorgojos macho y hembra de *E. kamerunicus* que visitaron la flor masculina en antesis de diferentes progenies de palma de aceite.

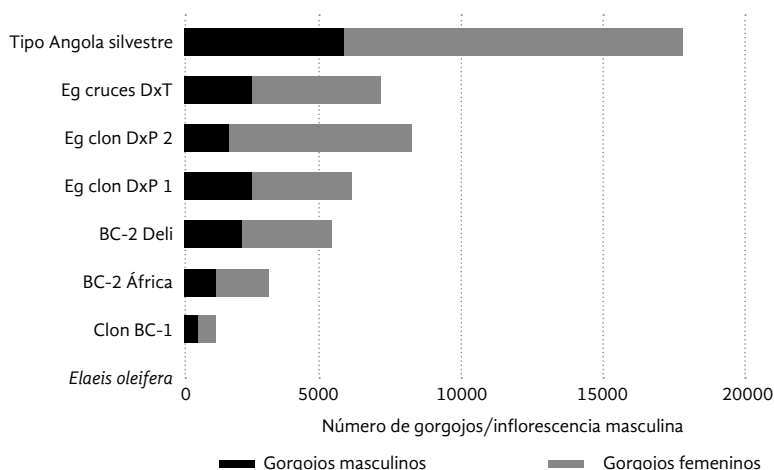
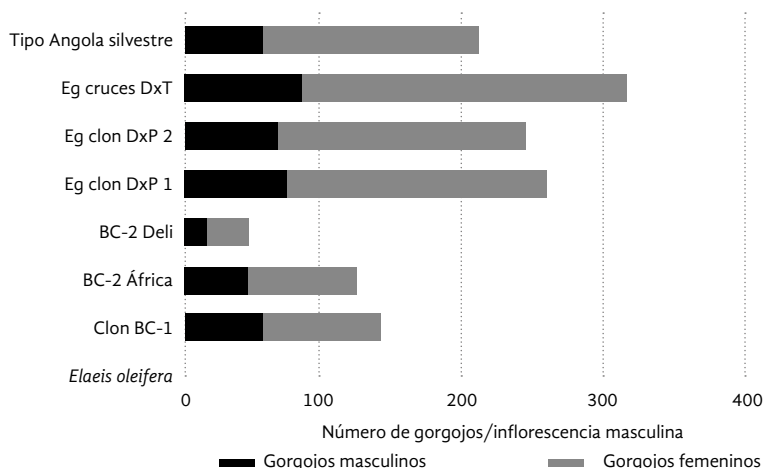


Figura 7. Número de gorgojos macho y hembra de *E. kamerunicus* que visitan la flor femenina receptiva de diferentes progenies de palma de aceite.



cas de *E. oleifera*. Este resultado está en línea con los reportados por Tan (1985), en los que el híbrido de *E. guineensis* x *E. oleifera* es menos atractivo para el gorgojo polinizador. Por lo tanto, si *E. kamerunicus* se presenta como el único polinizador, los criadores e investigadores deben encontrar una manera para hacer que las flores de estos materiales se vuelvan más llamativas para el escarabajo, por ejemplo a través de otros programas de reproducción, encontrando un atrayente que no interfiera con la polinización o introduciendo un nuevo insecto polinizador.

Grasidius hybridus es un insecto polinizador que suele encontrarse en *E. olifera* (Auffray *et al.* 2017). La observación de campo en Ecuador mostró que *G. hybridus* es más activo en las tardes, mientras que *E. kamerunicus* lo es en las mañanas. Por otra parte, *E. kamerunicus*, *E. subvittatus* y *Mystrops costaricensis* todavía tienen una oportunidad similar de superar el problema del bajo llenado de frutos en el híbrido OxG, un material de siembra resistente contra la enfermedad de Pudrición del cogollo (Meléndez & Ponce, 2016).

Enfoques para aumentar el llenado de frutos en la plantación de palma de aceite

Existen varias técnicas que han sido introducidas por IOPRI con el fin de aumentar el llenado de fru-

tos de la palma de aceite en Indonesia. El sistema de incubación, un método para elevar la población de *E. kamerunicus* a través de la introducción de inflorescencias masculinas posantesis, es capaz de incrementar el llenado de frutos en la palma de aceite madura temprana en 30,11 % (Arianto *et al.*, 2013), pero no es efectiva en la palma de aceite con una alta proporción de sexos (Figura 8). Se han realizado esfuerzos para mejorar el sistema mediante la aspersión directa de polen a los gorgojos que emergen de inflorescencias posantesis, los cuales han mostrado que el método mejorado, conocido como el sistema de incubación y transporte (Figura 9), ha permitido incrementar el llenado de frutos entre 22,09 y 31,13 % (Prasetyo *et al.*, 2014). Sin embargo, este requiere supervisión intensiva, por lo que en la mayoría de los casos su aplicación a gran escala solo es efectiva en el corto plazo debido a inconsistencias en el control. Este método fue modificado para que su aplicación y supervisión resultaran más fáciles, recibiendo el nombre de incubación y transporte móvil (Figura 10), puesto que la caja de incubación ya no se ubica en el campo sino en grupo cerca de la oficina de la finca. En la madrugada, el supervisor recoge la bolsa de gorgojos y la distribuye en los cosechadores antes de salir de la oficina. Posteriormente, el cosechador los libera en el bloque de siembra que se está cosechando. La implementación de esta técnica móvil logró aumentar el llenado de frutos entre 16,09 y 26,69 %.

Figura 8. Sistema de incubadora.



Figura 9. Sistema de incubación y transporte.



Figura 10. Sistema de incubación y transporte móvil.



Desafíos a futuro

La deforestación y los problemas ambientales inhibirán la expansión de los cultivos de palma de aceite, particularmente en Indonesia. Por lo tanto, la creación de un material de siembra de alto rendimiento y calidad del aceite continúa siendo un desafío para los cultivadores. Al respecto, el material derivado de cruces de *E. guineensis* x *E. olifera* puede generar un

nuevo problema de llenado de frutos en Indonesia, por lo que se hace necesario el uso del método de incubación y transporte (o Kairomix) para superar esta limitante en el corto plazo.

Investigaciones futuras deben enfocarse en cómo mantener un alto llenado de frutos de la palma de aceite mediante la optimización de insectos polinizadores naturales, por ejemplo, con la introducción de nuevas especies y el desarrollo de nuevas metodologías.

Referencias

- Ahmad, M. N., Ali, S. R. A., Masri, M. M. M., & Wahid, M. B. (2009). Effect of *Bacillus thuringiensis*, Terakil-1® and Teracon-1® against oil palm pollinator, *Elaeidobius kamerunicus* and beneficial insects associated with *Cassia cobanensis*. *Journal of Oil Palm Research*, 21(2), 667-674.
- Ahmad, M. N., Ali, S. R. A., Masri, M. M. M., & Wahid, M. B. (2012). Effect of Bt products, LEPCON-1, BAFOG-1 (S) and ECOBAC-1 (EC), against the oil palm pollinating weevil, *Elaeidobius kamerunicus*, and beneficial insects associated with *Cassia cobanensis*. *Journal of Oil Palm Research*, 24, 1442-1447.
- Arianto, I. W., Prasetyo, A. E., Susanto, A., & Riyanto, A. (2013). Peranan *Elaeidobius kamerunicus* dalam Peningkatan *Fruit Set* Kelapa Sawit. *Prosiding Pertemuan Teknis Kelapa Sawit*, Jakarta, Indonesia,
- Auffray, T., Frérot, B., Poveda, R., Louise, C., & Beaudoin-Ollivier, L. (2017), Diel patterns of activity for insect pollinators of two oil palm species (Arecaceae). *Journal of Insect Science*, 17(2), 1-6.
- Badan Pusat Statistik [BPS] (2017). *Statistik Indonesia 1997-2017*. Jakarta: BPS.
- De-Chenon, R. D. (2016). Keynote speech: the current and future challenges of pests, disease, weeds and biodiversity in oil palm. *Proceeding of Sixth IOPRI-MPOB International Seminar of Pests and Diseases*, Medan, Indonesia.
- Dhilleepan, K. (1992). Pollen carrying capacity, pollen loads, pollen-transferring ability of the oil palm pollinating weevil *Elaeidobius kamerunicus* Faust in India. *Oleagineux*, 47, 55-61.
- Ditjenbun, A. (2017). *Statistik Perkebunan Indonesia, 2015-2017 Kelapa Sawit*, Direktorat Jendral Perkebunan, Kementrian Pertanian RI: Jakarta, Indonesia.
- Fox, C. W., Scheibly, K. L., Smith, B.P., & Wallin, W.G. (2007). Inbreeding depression in two seed-feeding beetles, *Callosobruchus maculatus* and *Sator limbatus* (Coleoptera: Chrysomelidae). *Bulletin of Entomological Research*, 97, 49-54.
- Gerloff, C.U., & Schmid-Hempel, P. (2005). Inbreeding depression and family variation in a social insect, *Bombus terrestris* (Hymenoptera: Apidae). *OIKOS*, 111, 67-80.
- Hambal, K. R. A. (2009). *Toxicity of imidacloprid and cypermethrin against the oil palm pollinating weevil Elaeidobius kamerunicus Faust (Coleoptera: Curulionidae)*. Universiti Putra Malaysia.
- Harahap, I. Y., Sumaryanto, W., Rizki, A.E., Prasetyo, R., Damanik, M., & Arif, M. (2013). Buah landak kelapa sawit: ditinjau dari aspek ekofisiologi. *Prosiding Pertemuan Teknis Kelapa Sawit*, Jakarta, Indonesia.
- Hendrik, P. W., & Kalinowski, S. T. (2000). Inbreeding depression in conservation biology. *Annual Review of Ecological Systematic*, 31, 139-62.
- Hutauruk, C. H., Sipayung, A., & Sudharto, P. S. (1982). *Elaeidobius kamerunicus* Fst: hasil Uji Kekhususan Inang dan Peranannya Sebagai Penyerbuk Kelapa Sawit. *Buletin Pusat Penelitian Marihat*, 3(2), 1-15.
- Hutauruk, C., H., Sudharto, P. S., Simangunsong, G., & Sipayung, A. (1985). Menjelang Dua Tahun Serangga Penyerbuk Kelapa Sawit *Elaeidobius kamerunicus* di Indonesia. *Simposium Kelapa Sawit*, Medan, Indonesia.
- Kok, C. C., Eng, O. K., Razak, A. R., Marcon, P. G., & Loong, L. K. (2010), Chlorantraniliprole: a novel insecticide for bagworm (*Metisa plana*) control in oil palm plantation. *The Planters*, 86(1009), 223-235.

- Lubis, F. I., Sudrajat, S., & Dono, D. (2017). Populasi serangga penyerbuk kelapa sawit *Elaeidobius kamerunicus* Faust dan pengaruhnya terhadap nilai fruit set pada tanah berliat, berpasir dan gambut di Kalimantan Tengah, Indonesia. *Jurnal Agrikultura*, 28(1), 39-46.
- Meléndez, M. R., & Ponce, W. P. (2016). Pollination in the oil palms *Elaeis guineensis*, *E. oleifera*, and their hybrids (OxG) in tropical America. *Pesquisa Agropecuaria Tropical*, 46(1), 102-110.
- Ningrum, D. A., Wening, S., & Hanum, S. (2014). Screening of AFLP Primers for Molecular Variability Test in Wild Type Oil Palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) from Cameroon. *Proceedings of IOPC*, Bali, Indonesia.
- Omar, D. (2011). *Toxicity of TMOF against the oil palm pollinator, Elaeidobius kamerunicus* Faust. *Final Report*. Department of Plant Protection, Faculty of Agriculture, University Putra Malaysia.
- Permana, A. D., Permana, B., Sahari, B., Putra, R. E., & Kinasih, I. (2017). Estimating numbers of oil palm (*Elaeis guineensis*) pollen grains using image analysis and processing. *Journal of Oil Palm Research*, 29(3), 311-317.
- Prasetyo, A. E., & De-Chenon, R. (2018). New findings on the behaviour of *Elaeidobius kamerunicus* regarding to oil palm pollination. *Journal of Oil Palm Research* (in press).
- Prasetyo, A. E., Priwiratama, H., Rozziansha, T. A. P., & Susanto, A. (2018a). Pentingnya introduksi *Elaeidobius kamerunicus* pada pengembangan kebun kelapa sawit di pulau baru di Indonesia. *Warta PPKS*, in review.
- Prasetyo, A. E., López, J. A., Eldridge, J. R., Zommick, D. H., & Susanto, A. (2018b). Long-term study of *Bacillus thuringiensis* towards *Tirathaba rufivena* Walker and the effect to *Elaeidobius kamerunicus* Faust, insect biodiversity and oil palm productivity. *Journal of Oil Palm Research*, 40(1), 1-11.
- Prasetyo, A. E., Syahputra, B., Fahlevi, M. R., Rozziansha, T. A. P., Susanto, A., & Wening, S. (2017). Molecular Characterization of *Elaeidobius kamerunicus* Faust, (Coleoptera: Curculionidae) in North Sumatera. *Program book World Plantation Conferences and Exhibition*, Jakarta, Indonesia.
- Prasetyo, A. E., & Susanto, A. (2016). Perkembangan populasi *Elaeidobius kamerunicus* Faust pasca introduksi dan peningkatan fruit set kelapa sawit di Pulau Seram, Maluku, Indonesia. *Jurnal Penelitian Kelapa Sawit*, 24(1), 47-55.
- Prasetyo, A. E., Susanto, A., & Siregar, H. H. (2016). Effect of haze on *Elaeidobius kamerunicus* activity and oil palm productivity. *Proceeding of Sixth IOPRI-MPOB International Seminar of Pests and Diseases*. Medan, Indonesia.
- Prasetyo, A. E., & Susanto, A. (2015). Kairomik: Atraktan dan Perata Populasi *Elaeidobius kamerunicus* Faust. *Prosiding Pertemuan Teknis Kelapa Sawit*, Yogyakarta, Indonesia.
- Prasetyo, A. E., Sunindyo, D., & Susanto, A. (2015a). Flubendiamida: Insektisida Potensial untuk Hama Kelapa Sawit yang Aman Terhadap *Elaeidobius kamerunicus* Faust. *Prosiding Pertemuan Teknis Kelapa Sawit*, Yogyakarta, Indonesia.
- Prasetyo, A. E., Priwiratama, H., & Susanto, A. (2015b). Peningkatan Fruit Set Kelapa Sawit di Kalimantan dengan Introduksi *Elaeidobius kamerunicus* Faust dari Sumatera Utara. *Prosiding Pertemuan Teknis Kelapa Sawit*, Yogyakarta, Indonesia.
- Prasetyo, A. E., & Susanto, A. (2014). Status of *Elaeidobius kamerunicus* towards 30 years in Indonesia. *Proceedings of IOPC 2014*, Bali, Indonesia, Session VI: 340-348.
- Prasetyo, A. E., Purba, W. O., & Susanto, A. (2014). *Elaeidobius kamerunicus*: application of hatch and carry technique for increasing oil palm fruit set. *Journal of Oil Palm Research*, 26(3), 195-202.
- Prasetyo, A. E. (2013). Aktivitas *Elaeidobius kamerunicus* Faust pada perkebunan kelapa sawit yang berpotensi produksi tinggi. *Warta PPKS*, 18(2), 59-65.

- Prasetyo, A. E., Sunindyo, D., Tolentino, P., & Susanto, A. (2013). Pengaruh beberapa jenis bahan aktif insektisida terhadap mortalitas dan kemunculan kumbang baru *Elaeidobius kamerunicus* Faust. *Jurnal Penelitian Kelapa Sawit*, 21(3), 105-114.
- Prasetyo, A. E., & Susanto, A. (2012a). Meningkatkan Fruit Set kelapa sawit dengan teknik hatch & carry *Elaeidobius kamerunicus*. *Seri Kelapa Sawit Populer 11 Pusat Penelitian Kelapa Sawit*, Medan, Indonesia,
- Prasetyo, A. E., & Susanto, A. (2012b). Serangga penyerbuk kelapa sawit *Elaeidobius kamerunicus* Faust: agresivitas dan dinamika populasi di Kalimantan Tengah. *Jurnal Penelitian Kelapa Sawit*, 20(3), 103-113.
- Prasetyo, A. E., Arif, M., & Hidayat, T. C. (2012). Buah landak pada tanaman muda kelapa sawit. *Warta PPKS*, 17(1), 13-20.
- Purba, A. R., Prasetyo, A. E., Kurniawan, A., Supena, N., Siregar, H. A., Sujadi, S. P., Hasibuan, H. A., Arif, M., & Suprianto, E. (2016). Oil Palm Pollinator Weevil *Elaeidobius kamerunicus* and the Fruit Set in Indonesia. *Proceeding of Sixth IOPRI-MPOB International Seminar of Pests and Diseases*, Medan, Indonesia.
- Purba, R. Y., Rozziansha, T. A. P., & Prasetyo, A. E. (2013). Efektivitas Penyerbukan dan Peranan Tikus (*Rattus tiomanicus*) Sebagai Predator Utama SPKS *Elaeidobius kamerunicus* pada Tanaman Muda Kelapa Sawit. *Prosiding Pertemuan Teknis Kelapa Sawit*, Jakarta, Indonesia.
- Purba, R. Y., Harahap, I. Y., Pangaribuan, Y., & Susanto, A. (2010). Menjelang 30 tahun keberadaan serangga penyerbuk kelapa sawit *Elaeidobius kamerunicus* Faust di Indonesia. *Jurnal Penelitian Kelapa Sawit*, 18(2), 73-85.
- Purba, A. R., Supriyanto, E., Supena, N., & Arif, M. (2009). Peningkatan produktivitas kelapa sawit dengan menggunakan bahan tanaman unggul. *Prosiding Pertemuan Teknis Kelapa Sawit*, Jakarta,
- Rozziansha, T. A. P., & Prasetyo, A. E. (2017). Biology of *Elaeidobius kamerunicus* in the Lowland and Highland on North Sumatra, Indonesia. *Proceeding of International Society of Oil Palm Agronomists*, Malaysia.
- Simanjuntak, D., Prasetyo, A. E., & Susanto, A. (2015). Karakteristik populasi, siklus hidup, dan aktivitas *Elaeidobius kamerunicus* di perkebunan kelapa sawit dataran tinggi. *Warta PPKS*, 20(1), 19-24.
- Sipayung, A., & Lubis, A. U. (1987). Dampak Pelepasan *Elaeidobius kamerunicus* Fst di Indonesia Dan Malaysia. *Buletin Pusat Penelitian Marihat*, 7(2), 7-14.
- Subardja, D., Irsal, L., & Saleh, A. (2006). Distribution of land potential for oil palm extensification in Indonesia. *Proceeding of International Oil Palm Conference*, Bali,
- Sumitro, S., Manik, W., Panjaitan, A., Prasetyo, A.E., & Susanto, A. (2014). Hatch and carry mobile: new modification technique to increase oil palm fruit set. *Proceedings of IOPC 2014*, Bali, Indonesia, AGR-P, 40, 574-580.
- Susanto, A., Prasetyo, A. E., & Rozziansha, T. A. P. (2015). Metode estimasi populasi *Elaeidobius kamerunicus* di perkebunan kelapa sawit. *Warta PPKS*, 20(2), 53-59.
- Susanto, A., Purba, R. Y., & Prasetyo, A. E. (2007). *Elaeidobius kamerunicus*: Serangga Penterbuk Kelapa Sawit. *Seri Buku Saku 28 Pusat Penelitian Kelapa Sawit*, Medan,
- Syed, R. A. (1982). Study on Oil Palm Pollination by Insect. *Bulletin of Entomological Research*, 69, 213-224.
- Tamura, K., Stecher, G., Peterson, D., Filipski, A., & Kumar, S. (2013), MEGA6: Molecular Evolutionary Genetics Analysis version 6.0. *Molecular Biology and Evolution*, 30, 2725-2729.

- Tan, Y. P. (1985). Weevil pollination in the *Elaeis oleifera* x *Elaeis guineensis* hybrid, In: *Proceedings of the Symposium Impact of the pollinating weevil on the Malaysian oil palm industry*, Oil Research Institute of Malaysia, Kuala Lumpur,
- Tuo, Y., Akpesse, A. A. M., Hala, N., & Koua, H. K. (2011a). Impact of terrestrial spraying of thio-cyclam hydrogen oxalate on oil palm pollinating insects. *Journal of Agriculture and Biological Sciences*, 2(7), 208-213.
- Tuo, Y., Koua, H. K., & Hala, N. (2011b), Biology of *Elaeidobius kamerunicus* and *Elaeidobius plagiat* (Coleoptera: Curculionidae) main pollinators of oil palm in West Africa. *European Journal of scientific Research*, 49(3), 426-423.
- Vitikainen, E. (2010). *Causes and consequences of inbreeding in the ant Formica exsecta*. Dissertation, Faculty of Biosciences, University of Helsinki, Finland.
- Vos, P., Hogers, R., Bleeker, M., Reijans, M., Van de Lee, T., Hornes, M., Friters, A., Pot, J., Paleman, J., Kuiper, M., & Zabeau, M. (1995). AFLP: a new technique for DNA fingerprinting. *Nucleic Acids Research*, 23, 4407-4414.
- Wening, S., Prasetyo, A. E., Rozziansha, T. A. P., & Susanto, A. (2016). Optimasi protokol ekstraksi DNA *Elaeidobius kamerunicus*. *Jurnal Penelitian Kelapa Sawit*, 24(2), 77-86.

Desarrollo de un sistema de detección y conteo automático para *Metisa plana* Walker (Lepidoptera: Psychidae)*

Development of an Automated Detection and Counting System for the Bagworms *Metisa plana* Walker (Lepidoptera: Psychidae)

AUTORES: Abdul Rashid Mohamed Shariff, Facultad de Ingeniería, Universidad Putra (Malasia). Mohd Najib Ahmad, Facultad de Ingeniería, Universidad Putra (Malasia) (MPOB). Ishak Aris, Facultad de Ingeniería, Universidad Putra (Malasia). Izhal Abdul Halin, Facultad de Ingeniería, Universidad Putra (Malasia). Ramle Moslim, (MPOB).

CITACIÓN: Shariff, A. R., Ahmad, M. N., Aris, I., Halin, I. A., & Moslim, R. (2019). Desarrollo de un sistema de detección y conteo automático para *Metisa plana* Walker (Lepidoptera: Psychidae). *Palmas*, 40 (Especial Tomo I), 111-116.

PALABRAS CLAVE: *Metisa plana*, segmentación de imagen, características de color, detección de objetos, agricultura de precisión.

KEYWORDS: *Metisa plana*, image segmentation, color features, object detection, precision agriculture.

*Artículo original recibido en inglés y traducido por Carlos Arenas París.



ABDUL RASHID MOHAMED SHARIFF
Investigador Facultad de Ingeniería,
Universidad Putra (Malasia)
Researcher
Faculty of Engineering, University
Putra (Malaysia)

Resumen

Metisa plana Walker es una de las principales y más serias amenazas de plagas de insectos comedores de hojas de las plantaciones de palma de aceite en Malasia. El impacto económico de un ataque moderado de este, con un daño de hojas de 10 a 50 %, puede ocasionar pérdidas en el rendimiento de este cultivo cercanas a 43 %. La población no controlada de *Metisa plana* suele aumentar por encima de los límites del umbral, causando brotes serios de esta plaga. Debido a su impacto, es necesario monitorear y detectar la población de este insecto en la palma de aceite para garantizar una planeación apropiada de cualquier acción de control en las áreas infestadas, lo cual requiere un sistema de monitoreo preciso para vigilar la población y los niveles de infestación. Por ello, se inició un estudio sobre el desarrollo

de un algoritmo de procesamiento de imágenes para la detección y el conteo de especies de *Metisa plana* Walker, utilizando la segmentación de imágenes con base en características de color y forma en combinación con aprendizaje profundo y redes neuronales celulares (RNC) para la detección de objetos en tiempo real. El procesamiento de color se acercó a una precisión baja en la detección, con un promedio de 40 y 34 % a una distancia de cámara de 30 cm y 50 cm, respectivamente. Aplicando una red neuronal convencional profunda, el porcentaje de detección aumentó considerablemente, con una precisión de hasta 95 %, con una mayor precisión a 30 cm de distancia. Se recomendó desarrollar este robusto algoritmo, puesto que la información será útil, importante y crucial para crear un sistema o dispositivo de monitoreo, y para integrarlo con imágenes inalámbricas basadas en el internet de las cosas (IoT, por sus siglas en inglés) en el futuro.

Abstract

The bagworm is one of main and serious leaf eating insect pest threats of the oil palm plantations in Malaysia. The economic impact from a moderate bagworm attack of 10-50% leaf damage may cause 43% yield loss. A precise monitoring system through the application of device to monitor bagworm population and infestation level is required to overcome recurrence outbreak. Hence, a study on the development of image processing algorithm for detection and counting of the oil palm bagworms species of *Metisa plana* Walker was initiated by using image segmentation based on color and shape features, combined with deep learning and Cellular Neural Networks (CNN) towards real time object detection. The color space processing technique showed that the average accuracy of detection was low, 40 and 34%, within 30 and 50 cm camera distance, respectively. However, to overcome low accuracy and slow processing of dataset, the deep convolutional neural networks was performed and resulted in high accuracy for object/bagworm detection, with a 85-95% accurate detection rate.

Introducción

Metisa plana Walker y *Pteroma pendula* Joannis son las principales y más serias plagas de las plantaciones de palma de aceite en Malasia. En el pasado, se implementó el manejo integrado de plagas de *M. plana*. Sin embargo, la información sobre su dinámica de población, incidencia, características biológicas y dispersión es insuficiente y existen brechas. Con base en registros de infestaciones (1986-2000), se confirmó que más de 63.955 ha de palma de aceite sembradas en 69 fincas de Malasia peninsular fueron atacadas por *M. plana* y *P. pendula*. Se evidenció que las infestaciones son de especies únicas y mixtas, oscilando entre cero y 7.811 ha por año (Ho *et al.*, 2011).

Realizar un censo es vital para el control efectivo de *M. plana* en las plantaciones de palma de aceite, puesto que este procedimiento permite contabilizar directamente el número de plagas de insectos para hacer evaluaciones posteriores. Su procedimiento involucra

una inspección superficial en búsqueda de signos de incidencia de la plaga y una evaluación o “enumeración” más detallada (Corley *et al.*, 2003). Los datos promedio determinan la gravedad de los brotes de la plaga de insectos, información que puede ser utilizada para la sincronización precisa del control de plagas. En la actualidad, el censo se realiza manualmente mediante la observación a simple vista y métodos de conteo. Adicionalmente, se puede compilar la recolección de datos precisos para el posterior análisis y evaluación de las medidas de control tomadas para combatir la *M. plana*. Posteriormente, se investigan y estiman los resultados para obtener un mejor rendimiento de racimos de fruta fresca en el futuro. Con el fin de compilar una recolección precisa de datos, se propone un método avanzado que emplea el análisis de imágenes y técnicas de aprendizaje profundo.

Esta última técnica es una parte del aprendizaje automático en el que un modelo o sistema realiza tareas de clasificación o funciones directamente a partir

de una imagen, una palabra o un sonido. Se opera con base en una arquitectura de redes neuronales. Irónicamente, “profundo” se refiere al número de capas que funcionan en la red: entre más capas, más profunda es. Normalmente, las redes profundas tienen cientos de capas, mientras que las neuronales obsoletas solo dos o tres. Además, esta técnica reemplaza la habilidad manual en la extracción de características, mediante el uso de algoritmos efectivos sin o con supervisión parcial, junto con la eliminación jerárquica de características (Aiman & Vishwakarma, 2017; Bengio, 2012).

Considerando la importancia de la recolección precisa de datos, el desarrollo del dispositivo basado en tierra con un algoritmo robusto es la primera innovación en la historia de la industria de la palma de aceite, en reducir el error humano en el censo y promover prácticas de agricultura de precisión. Aplicando algoritmos de procesamiento de imágenes, el dispositivo sirve para monitorear la población de *M. plana* y, en consecuencia, incrementar el rendimiento y la productividad del cultivo. El objetivo de este estudio es evaluar la efectividad y grado de precisión de los algoritmos de procesamiento de imagen desarrollados para detectar y contar la población de *M. plana* en plantaciones de palma de aceite infestadas.

Materiales y métodos

Se aplica un enfoque de procesamiento de imágenes para extraer *M. plana* y separarlas del fondo. La construcción de un algoritmo de análisis de imágenes consta de cuatro etapas: i) la primera incluye el desarrollo de un algoritmo de segmentación para localizar/detectar la región de interés (RdI) en un conjunto de datos basado en el procesamiento de colores y para trazar los objetos (*M. plana*) y remover el fondo innecesario; ii) la segunda usa el método del operador morfológico, que se enfoca en extraer el objeto que corresponden con el patrón de la forma, y elimina regiones no objetivo en el conjunto de datos; iii) la tercera aplica un algoritmo de clasificación supervisada con base en los datos de entrenamiento específico para el reconocimiento de tamaño y forma, y también para identificar las *M. plana* vivas y muertas; iv) la cuarta trata del algoritmo de conteo para determinar la población de *M. plana* que corresponden a grupos

específicos, con lo que se pueden detectar los insectos vivos. Adicionalmente, se realizó una evaluación y monitoreo del rendimiento del algoritmo desarrollado con éxito utilizando el *software* Python.

Para apoyar los resultados de procesamiento de color se desarrolló un conjunto de datos entrenado para la detección de objetos y reconocimiento de las etapas de *M. plana* y se creó un algoritmo utilizando técnicas de aprendizaje profundo con redes neuronales celulares (RNC). Una RNC está conformada por una capa de entrada, una de salida y muchas escondidas en medio. La convolución coloca las imágenes de entrada en un conjunto de filtros, cada uno de los cuales activa ciertas características de las mismas. La posición de la cámara respecto a los objetivos se fijó a 30 y 50 cm de distancia, con el fin de reducir o minimizar los cambios en las condiciones de luz, sombras, vibración u objetos repentinos capturados durante la grabación.

El aprendizaje profundo con un algoritmo de RNC para detectar *M. plana* se realizó de la siguiente manera:

Proceso de entrenamiento

- Las muestras de entrenamiento fueron recolectadas por MPOB HQ en Bangiy Banting, Selangor, Malasia.
- Se tomó una muestra de cuadros de un archivo de video.
- Las imágenes se etiquetaron y se determinó, manualmente, su cuadro delimitador alrededor de la figura de la *M. plana*.
- La imagen etiquetada fue trabajada utilizando modelos preentrenados.
- Los modelos se tomaron de una RNC preentrenada.

Pruebas del modelo

- El archivo de video fue cargado y se capturó un cuadro.
- Se redimensionó una imagen de entrada a 960 x 540 píxeles.
- Esta se procesó en la RNC para identificar el objeto (*M. plana*).

- d. Luego, apareció un conjunto de datos con información del objeto dentro del cuadro delimitador.
- e. La información del procesamiento de la RNC fue visualizada, superponiendo el cuadro delimitador alrededor del objeto con niveles de confianza por encima de 90 %.
- f. Posteriormente, este cuadro fue guardado en un archivo de video.

Resultados y discusión

Procesamiento del color

La técnica del procesamiento de espacios de color mostró que la precisión de la detección era baja, con un promedio de 40 y 34 %, con una distancia de cámara de 30 y 50 cm, respectivamente. Se establecieron los parámetros a su valor óptimo, pero los resultados continúan siendo bajos para la detección del objeto. Igualmente produjo reconocimiento erróneo (Figura 1). Esto se debió a la similitud de colores entre los folíolos dañados y la *M. plana*. Utilizando métodos de espacio de color, parece difícil enfocarse en el objetivo, aunque se filtró la imagen mediante un operador de suavizado gaussiano para eliminar ruido y mejorar la calidad (Nameirakpam *et al.*, 2015).

Aprendizaje profundo con RNC

El porcentaje de detección aumentó considerablemente al aplicar una red neuronal profunda convolucional, llegando a una precisión de entre el 88 y 100 %. Respecto a la distancia de la cámara, la de 30 cm resultó en un mayor porcentaje de detección debido a la cercanía y a una mayor detección del foco, lo que permitió un mejor efecto de reconocimiento de objetos (Figura 2). Por lo tanto, la distancia de la cámara juega un papel importante para maximizar los detalles del objeto reconocido durante la toma de la imagen (Westerman *et al.*, 2013) (Figura 4).

Conclusiones

A partir de este estudio, revelamos que el aprendizaje profundo con RNC es factible y tiene potencial para ser más práctico en la detección de objetos/ *M. plana*, con alta precisión, detección de aproximadamente 85 a 95 %, en comparación con el enfoque de procesamiento de color por sí solo. Respecto a la distancia de la cámara, la de 30 cm resultó en un mayor porcentaje de detección debido a la cercanía y a un mayor enfoque, lo que otorgó un mejor efecto de reconocimiento de objetos.

Figura 1. Detección errónea del color en objetos objetivo mediante técnica de procesamiento de color.



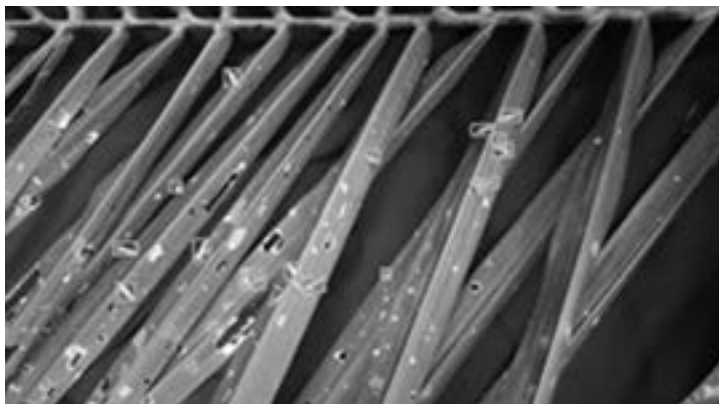
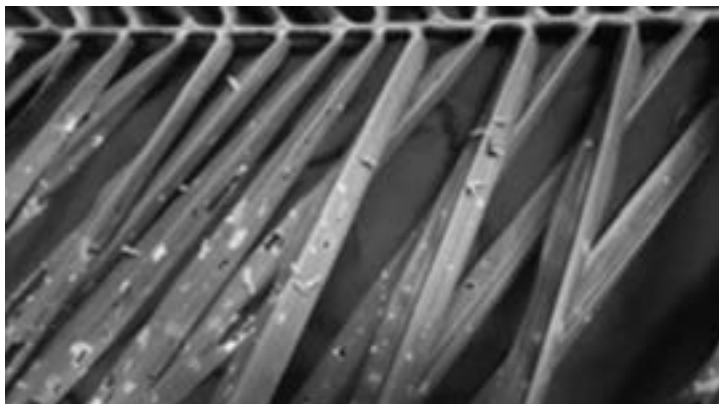


Figura 2. Efecto de la distancia de la cámara en la detección de *M. plana* a 30 cm (arriba) y 50 cm (abajo).

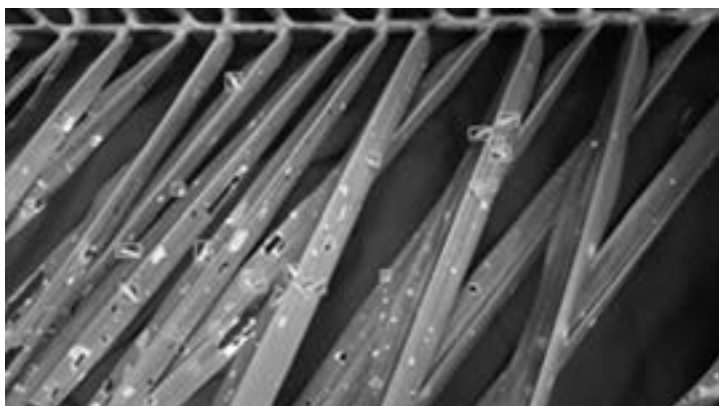
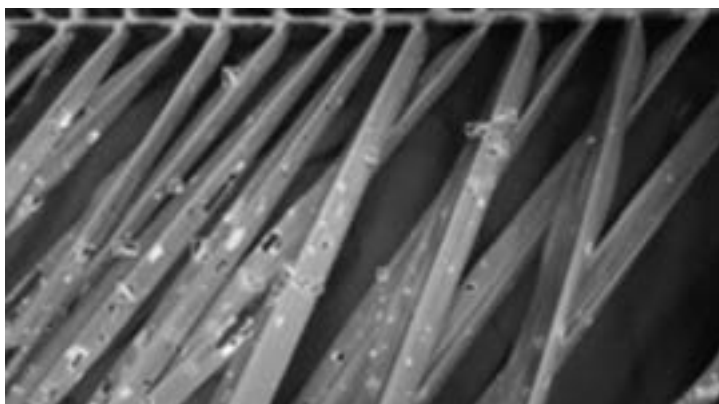


Figura 3. Precisión de detección aumentada con el enfoque de aprendizaje profundo a 30 cm (arriba) y 50 cm (abajo) de distancia de la cámara.

Referencias

- Bengio, Y. (2012). Deep learning of representations for unsupervised and transfer learning. *ICML Unsupervised and Transfer Learning*, 27, 17-36.
- Corley, R. H. V., & Tinker, P. B. H. (2003). Chapter 12: Disease and pest of the oil palm. In *The Oil Palm* (4th Ed.). London: Blackwell Science Ltd.
- Ho, C. T., Yusof, I., & Khoo, K. C. (2011). Infestations by the bagworms *Metisa plana* and *Pteroma pendula* for the period 1986-2000 in major oil palm estates managed by Golden Hope Plantation Berhad in Peninsular Malaysia. *Journal of Oil Palm Research*, 23, 1040-1050.
- Nameirakpam, D., Khumanthem, M., & Yambem, J. C. (2015). Image Segmentation using K-means Clustering Algorithm and Subtractive Clustering Algorithm. *Procedia Computer Science*, 54, 764-771.
- Westerman, S., Buchner, H. H. F., Schramel, J., Tichi, A., & Stanek, C. (2013). Effects of infrared camera angle and distance on measurement and reproducibility of thermographically determined temperatures of the distolateral aspects of the forelimbs in horses. *JAVMA Scientific Reports*, 242, 388-395.

Desarrollo de nuevos cultivares de palma de aceite en Malasia con especial referencia a los protocolos para desarrollar y liberar un nuevo cultivar

Development of New Oil Palm Cultivars in Malaysia with Special Reference to Protocols in Developing and Releasing a New Cultivar

AUTORES: Ahmad Kushairi Din, Centro de Biotecnología y Fitomejoramiento Avanzados, (MPOB). Mohd Din Amiruddin, Centro de Biotecnología y Fitomejoramiento Avanzados, (MPOB).

CITACIÓN: Kushairi-Din, A., Din-Amiruddin, M. (2019). Desarrollo de nuevos cultivares de palma de aceite en Malasia con especial referencia a los protocolos para desarrollar y liberar un nuevo cultivar. *Palmas*, 40 (Especial Tomo I), 117-118.

PALABRAS CLAVE: palma de aceite, cultivares, mejoramiento genético, Malasia.

KEYWORDS: Oil palm, cultivars, plant breeding, Malaysia.



AHMAD KUSHAIRI DIN
Director General Malaysian Palm Oil
Board (MPOB)
CEO, MPOB

Tras el surgimiento de la industria de la palma de aceite a principios del siglo XX, las plantaciones comerciales utilizaban material de siembra Dura de cuesco duro y mesocarpio delgado. Inconsciente e informalmente, las castas se seleccionaban de las palmas y frutos que tenían “mejor apariencia” en los palmerales africanos o de las palmas ornamentales sembradas a lo largo de las avenidas en otros lugares. El descubrimiento de un solo gen hereditario para el espesor del cuesco llevó al uso de la variedad cultivada (cultivar) Dura x Pisífera (DxP) de cuesco más delgado y mesocarpio oleaginoso más grueso.

No obstante, las poblaciones para el mejoramiento genético de la palma de aceite se obtenían de unas pocas palmas ancestrales, lo cual obstaculizaba el avance de la selección.

La población básica de la línea materna de los programas de mejoramiento proviene casi exclusivamente de la Deli Dura. El mejoramiento de las líneas paternas Tenera/Pisífera eran principalmente poblaciones AVROS, La Mé y Yangambi. Los fitomejoradores malayos de palma de aceite practicaban ampliamente la selección recurrente modificada (SRM) en

los programas de mejoramiento. El diseño Carolina del Norte Modelo I (NCM1) se utiliza comúnmente para calcular la capacidad combinante de la Pisífera. Las líneas endógamas parentales posteriores desarrolladas en selecciones recurrentes, cruzadas y sometidas a pruebas de progenie explotando la heterosis habían aumentado el rendimiento de racimos y de aceite. La SRM permite incorporar nuevos genes en las líneas parentales y, debido a la necesidad de ampliar el acervo genético, se exploraron germoplasmas de *Elaeis guineensis* y *E. oleifera* en centros de origen y diversidad de África y América Latina, respectivamente. Además del mejoramiento para aumentar el rendimiento de racimos y aceite, los rasgos secundarios como el enanismo, la calidad del aceite y el contenido de fitonutrientes se incorporan en el desarrollo de nuevas variedades serie PS para efectos del nicho. Un cultivar notorio es el PS1 que se caracteriza por la corta altura de la palma. Se necesitan más de 20 años desde la recolección en estado silvestre hasta el lanzamiento de un nuevo cultivar.

Con el fin de agilizar la selección y el lanzamiento del cultivar, el material de mejoramiento selecciona-

do de manera preliminar se comparte entre los fitomejoradores locales de la industria para alcanzar un mayor mejoramiento. Además de la genética cuantitativa, el cultivo de tejidos, la biotecnología y la genómica también apoyan el desarrollo de cultivares. Las variedades nuevas se registran con base en las Guías de Ensayo para la distintividad, homogeneidad y estabilidad (DUS) de la Unión Internacional para la Protección de las Obtenciones Vegetales (UPOV).

La producción comercial y la venta de materiales de siembra de palma de aceite en Malasia están reglamentadas por ley. Los productores de semilla deben ser empresas debidamente constituidas, económicamente sólidas y contar con fitomejoradores competentes. Las semillas y plántulas que se venden comercialmente deben llenar los requisitos de la Norma Malasia MS157 (semillas) o MS2099 (clones) y suscribir los planes relevantes de certificación. Así mismo, las empresas deben obtener licencias para producir, almacenar, despachar y manipular los materiales de siembra. El desempeño en el campo del material de siembra de palma de aceite se evalúa de manera regular en ensayos comparativos.

Mejoramiento para la resistencia a la Pudrición del cogollo

Breeding for Bud Rot Resistance

CITACIÓN: Durand-Gasselin, T. (2019). Mejoramiento para la resistencia a la Pudrición del cogollo. *Palmas*, 40 (Especial, tomo I), 119-120.

PALABRAS CLAVE: mejoramiento, Pudrición del cogollo, palma de aceite.

KEYWORDS: breeding, Bud rot, oil palm.



TRISTAN DURAND-GASELIN
Director General PalmElit S.A.S.
CEO PalmElit S.A.S.

Resumen

El complejo Pudrición del cogollo es una enfermedad que se ha dispersado ampliamente en América. Por mucho tiempo, solo los híbridos interespecíficos fueron pensados para ser resistentes a la enfermedad. No obstante, se ha confirmado que *E. guineensis* puras son parcialmente resistentes. A pesar de que la Pudrición del cogollo presenta síntomas bastante diferentes de un lugar a otro, las resistencias genéticas a la enfermedad observadas en un lugar son válidas para otros. Diferentes estrategias que son complementarias se han desarrollado tanto para híbridos interespecíficos como para *E. guineensis*.

Abstract

The Bud Rot complex is a disease widely spread in America. For long only interspecific Hybrids were thought to be resistant to that disease. Pure *E. guineensis* have confirmed to be partially resistant. Despite Bud Rot has quite different symptoms from one location to another, the genetic resistances to that disease observed in one location are valid in another. Different strategy which are complementary have been developed as well for interspecific hybrids and *E. guineensis*.

Desarrollo de herramientas genómicas para el mejoramiento de palma de aceite. El proyecto OPGP*

Development of Genomics Tools for Oil Palm Breeding. The OPGP Project

CITACIÓN: Billote, N. (2019). Desarrollo de herramientas genómicas para el mejoramiento de palma de aceite. El proyecto OPGP. Palmas, 40 (Especial Tomo I), 121-129.

PALABRAS CLAVE: palma de aceite, *E. guineensis*, *E. oleifera*, genoma, OPGP.

KEYWORDS: oil palm, *E. guineensis*, *E. oleifera*, genomics, OPGP.

*Artículo original recibido en inglés y traducido por Carlos Arenas París.



NORBERT BILLOTTE

Centro de Cooperación Internacional
en Investigación Agronómica para el
Desarrollo (CIRAD)
Agricultural Research and International
Cooperation Organization, CIRAD

Resumen

Creado en 2008, el Consorcio Internacional Oil Palm Genome Projects (OPGP) es una asociación de 14 entidades públicas y privadas para el desarrollo de herramientas genómicas en el cultivo de la palma de aceite. Este trabajo describe las principales pautas y resultados de su innovadora investigación realizada en palma de aceite cultivada, así como en las especies silvestres de *E. oleifera* en Suramérica, útiles en la selección interespecífica. Se generó una gran cantidad de información, incluyendo secuencias transcriptómicas, mapas genéticos, genes candidato para rasgos agronómicos clave, secuenciación del genoma completo (WGS, por sus siglas en inglés) de la palma de aceite y marcadores de ADN cerrados de cualquier gen de interés agronómico. La mayoría de los resultados obtenidos en grandes germoplasmas y sistemas de reproducción de múltiples padres, aceleran la validación y uso de las herramientas de OPGP para la selección asistida por marcadores. En particular, se ha establecido un método preciso de selección genómica de la palma de aceite para acelerar la creación de

variedades mejoradas, resistentes a enfermedades graves y con mayor rendimiento de aceite de palma. De hecho, la hoja de ruta de investigación de los miembros de OPGP es un plan a largo plazo que prevé variedades de palma de aceite totalmente nuevas, también haciendo uso de genes favorables de *E. oleifera*, dedicada a intensificar el rendimiento del aceite de palma por un menor costo, así como la calidad y estabilidad en diversos entornos agroclimáticos, mediante sistemas operativos amigables con el ambiente.

Abstract

Created in 2008, the Oil Palm Genome Projects (OPGP) International Consortium is an association of fourteen private and public entities for developing genomic tools in oil palm. We describe main guidelines and results of its innovative researches conducted in the cultivated oil palm, as well as in the South-American wild relative *E. oleifera* species useful in interspecific selection. A huge amount of information was generated including transcriptomic sequences, genetic maps, candidate genes of key agronomic traits, own whole genome sequence (WGS) of oil palm and tight DNA markers of any gene of agronomic interest. Most results obtained on large germplasms and multi-parent breeding systems accelerate the validation and use of OPGP tools for marker-assisted selection. In particular, an accurate genomic selection method in oil palm is set up to accelerate the creation of better-improved varieties, more yielding in palm oil and resistant to major diseases. The research roadmap of the OPGP members is in fact a long-term plan foreseeing totally novel oil palm varieties, also making use favorable genes of *E. oleifera*, devoted to intensify at lower costs the palm oil yield, quality and stability in various agroclimatic environments through the implementation of operating systems respectful of the environment.

El consorcio internacional OPGP

El consorcio internacional Oil Palm Genome Projects (OPGP) es una entidad federativa creada en 2008 y conformada por 14 compañías privadas e institutos públicos de investigación en el sector de la agroindustria de la palma de aceite (Figura 1). El coordinador es el Centro Francés de Cooperación Internacional en Investigación Agronómica para el Desarrollo (CIRAD), y el Vicecoordinador es Neiker-Tecnalia, el Instituto Vasco de Investigación y Desarrollo Agrario. Los 14 miembros actuales del consorcio internacional Oil Palm Genome Projects, OPGP son: Cenipalma (Colombia), CIRAD (Francia), Neiker-Tecnalia Institute (España), Socfin Group (Luxemburgo), Asian Agri Group, PT Astra Agro Lestari Tbk, Indonesian Oil Palm Research Institute (IOPRI), PT Matahari Kahuripan Indonesia (MAKIN Group), PT SMART Tbk, PT Sampoerna Agro Tbk (Indonesia), Applied Agricultural Resources (AAR) Sdn. Bhd., Felda Glo-

bal Ventures Holdings Berhad (FGV), Genting Plantations Berhad e IOI Corporation Berhad (Malasia).

El principal objetivo del consorcio OPGP es desarrollar herramientas genómicas, conocimiento científico y métodos para acelerar el mejoramiento de la palma de aceite. La mayoría de sus miembros son grandes fincas y productores de semillas, lo que significa que dan prioridad a los principales rasgos de interés agronómico y valorizan los resultados de OPGP mediante aplicaciones de reproducción efectivas para mejorar las variedades de palma de aceite. De hecho, los asociados de OPGP representan cerca del 25 % del área total cultivada en palma de aceite del mundo. El espíritu del consorcio es alcanzar una visión y estrategia común para lograr una investigación genómica más avanzada, aplicada al mejoramiento de la palma de aceite y a mayores beneficios para los cultivadores. OPGP se ocupa de objetivos innovadores para cerrar las brechas actuales o futuras de información pública, o de resultados de otros centros de investigación que

Figura 1. Miembros actuales del consorcio internacional Oil Palm Genome Projects, OPGP.



estudian la palma de aceite. Sus miembros unen fuerzas en proyectos biotecnológicos ambiciosos y costosos (fondos, materiales genéticos, personal técnico y de investigación involucrado, etc.), para realizar investigaciones básicas de interés general.

Una lista enunciativa de los principales campos de investigación en proyectos de genómica que OPGP ha emprendido incluye:

- Estudios genómicos aplicados al mejoramiento genético de la palma de aceite.
- Desarrollo masivo de los recursos genómicos de *Elaeis guineensis* y de *Elaeis oleifera*.
- Identificación, aislamiento y marcación intragénica de todos los genes útiles tanto en *E. guineensis* como en *E. oleifera* (esta última siendo de gran valor para crear híbridos interespecíficos).
- Secuenciación de ADN en cromosomas y anotación de genes de *E. guineensis* y de *E. oleifera*.
- Herramientas basadas en ADN para aplicaciones de reproducción descendiente, que ayuden a los cultivadores y compañías productoras de semillas del consorcio OPGP
- Métodos y marcadores moleculares para la selección asistida por marcadores en palma de aceite.

Para llevar a cabo sus proyectos de investigación, los miembros de OPGP colaboran estrechamente con varios centros públicos de investigación en Francia, tales como el Instituto Nacional para la Investigación Agronómica (INRA), el Genoscope Centro Nacional de Secuenciación y el Centro de Recursos Genómicos de Plantas (CNRGV). El INRA, primer instituto de investigación agronómica de Europa y el segundo más grande del mundo en publicaciones en ciencias agrícolas y en ciencias animales y de las plantas, está llevando a cabo una investigación sobre una dieta saludable y de calidad para la agricultura sostenible y para un medioambiente conservado y valorado. Genoscope está desarrollando métodos y proyectos para la explotación de la biodiversidad, en particular respecto a la secuenciación masiva de ADN y a la bioinformática. CNRGV suministra herramientas genómicas innovadoras y eficientes para una mejor caracterización de la biodiversidad de las plantas, y un mayor entendimiento de cómo estas se adaptan a su entorno mediante el análisis de sus genomas. Otros actores clave de la investigación en el mejoramiento y el sector de producción de semillas de la palma de aceite, están entre los colaboradores cercanos del consorcio OPGP: PalmElit S.A. (Filial de CIRAD)

en Francia, Hacienda La Cabaña S.A. en Colombia, el Instituto Nacional de Investigación Agrícola (IN-RAB) en Benín y el PT. Socfindo en Indonesia.

Hoja de ruta de los proyectos genómicos de OPGP y la valorización de reproducción por parte de los socios

Los miembros de OPGP financian y llevan a cabo proyectos genómicos sucesivos y conjuntos, siguiendo las pautas de una hoja de ruta a largo plazo para el mejoramiento genético de la palma de aceite, con la ayuda de biotecnologías. Hasta el momento se han realizado tres: proyecto A, Proyecto A_PLUS y Proyecto B. En paralelo, se transfieren sus resultados a los socios en apoyo de sus propios planes internos de reproducción (clásica o esquemas de selección asistida por marcadores, MAS), así como su producción de semillas de variedades mejoradas.

Ya hemos mencionado los grandes problemas económicos, ecológicos y sociales de la palma de aceite, la primera fuente de grasas vegetales (Bilotte *et al.*, 2015). Es la planta oleaginosa con mayor capacidad para satisfacer las necesidades de grasas vegetales de la población del mundo a un menor costo. Una gran preocupación es ayudar a intensificar el cultivo de palma de aceite de una manera sostenible y amigable con el medioambiente, reduciendo la deforestación y la presión sobre la biodiversidad natural. Una verdad obvia es que plantar N hectáreas de palma de aceite es mejor que 10 x N hectáreas de soya, o incluso, más hectáreas de cualquier otra planta oleaginosa, en detrimento de bosques naturales y otras zonas ricas en biodiversidad. El consorcio OPGP se concentra en el conocimiento y metodologías científicas, particularmente para acelerar el mejoramiento genético y responsabilidad ambiental en el desarrollo de la palma de aceite. Los principales desafíos incluyen estabilizar y aumentar la producción de aceite de palma, en el contexto de las restricciones del cambio climático. Las variedades deseadas deben tener un conjunto de rasgos agronómicos relacionados con el crecimiento, la producción y la calidad del aceite de palma. La resistencia a las enfermedades según las áreas cultivadas completa estas características.

Resumimos nuestras pautas clave para ajustar la selección de las mejores variedades nuevas de palma de aceite, mediante una mejor vinculación de información de cromosomas (genes) con rasgos agronómicos para predecir su desempeño en campo, y para realizar una selección asistida de marcadores más efectiva. En este sentido, los proyectos de OPGP se enfocan en establecer correlaciones entre la información genómica y la de fenotipos (rasgos agronómicos observados que queremos mejorar).

Pautas clave para resultados más avanzados y nuevas variedades de palma de aceite

Es necesario introducir mayor variedad genética a las estrategias de reproducción, buscando variedades que estén mejor adaptadas a las limitaciones ambientales (bióticas y abióticas), y a prácticas que son menos demandantes en términos de capacidades técnicas, especialmente en plantaciones pequeñas. Además del enfoque que se basa exclusivamente en el mejoramiento genético de *E. guineensis*, la introducción y uso sistemático de rasgos y genes heredables de *E. oleifera* cumplirían mejor con algunos de estos requisitos. Adicionalmente, la riqueza genética de *E. oleifera* aporta la posibilidad de desarrollar palmas interespecíficas de menor tamaño que las que se cultivan en la actualidad, abriendo perspectivas para diferentes aceites y usos. Este criterio, respaldado por el que actualmente se centra casi que exclusivamente en la especie *E. guineensis*, constituye una base más robusta en respuesta a lo que está en juego. Por lo tanto, los proyectos de OPGP realizan investigaciones tanto en *E. guineensis* como en *E. oleifera*, permitiendo una mejor explotación de los genes favorables de *E. oleifera* en la creación y selección de *E. guineensis* y de variedades híbridas interespecíficas.

En el pasado, la mayoría de las variedades comerciales de palma de aceite eran *E. guineensis* puras. El rápido crecimiento del estípite resulta en altos costos de cosecha manual, limitando la duración de la explotación de cultivos con más de 25 años de edad, y reduciendo el desarrollo y rentabilidad de las plantaciones. El cultivo de híbridos interespecíficos de *E. oleifera* x *E. guineensis* ha aumentado durante las úl-

timas décadas en Latinoamérica, gracias a su calidad de resistencia genética a la enfermedad Pudrición del cogollo, endémica de esta región. Con un crecimiento de altura intermedio entre *E. oleifera* y *E. guineensis*, su cosecha es menos costosa en mano de obra, pero los híbridos interespecíficos tienen una menor producción.

OPGP apoya la creación y explotación de variedades enanas de *Elaeis*, igual de productivas que las actuales y puras de *E. guineensis*. Estas serán más fáciles de cosechar y menos costosas. También facilitarán el uso agroforestal, tal como la asociación de palmas con especies de alto valor como la teca u otras de fruto. Por lo tanto, los proyectos de OPGP están identificando los genes de enanismo de *E. oleifera* para introgresarlos en variedades élite de palma de aceite, mediante el retrocruzamiento interespecífico asistido por marcadores o por selección genómica. Otros genes de *E. oleifera* están siendo investigados con el objetivo de crear palmas que también produzcan sin abscisión y sin frutos de baja actividad de lipasa (para cosechas menos frecuentes), más ricas en aceite de palma de la pulpa del fruto y genéticamente resistentes a enfermedades graves.

Principales rasgos agronómicos y protocolos de caracterización

Los proyectos de OPGP estudian rasgos fenotípicos clásicos y, en particular, aquellos nuevos de interés para los cultivadores, utilizando innovadores protocolos estándar y los mejores diseños experimentales del campo de la genética. Estos rasgos incluyen: los elementales de rendimiento, la composición del ácido graso del aceite de palma, la eficiencia de fotosíntesis, el incremento en la altura del tallo, la eficiencia de las raíces para absorber elementos minerales de N, P, K, Mg, la tolerancia a la sequía y la resistencia genética a enfermedades.

Por ejemplo, se caracterizan los componentes físicos elementales del racimo en *E. guineensis*, en *E.*

Es necesario introducir mayor variedad genética a las estrategias de reproducción, buscando variedades que estén mejor adaptadas a las limitaciones ambientales (bióticas y abióticas), y a prácticas que son menos demandantes en términos de capacidades técnicas, especialmente en plantaciones pequeñas.

oleifera y en varios materiales genéticos interespecíficos, utilizando el mismo procedimiento estándar adaptado de un protocolo del socio de OPGP, Asian Agri Group. Este permite determinar con precisión la elaboración fenotípica del llenado y la morfología del fruto, la cantidad de aceite de palma y la composición de ácidos grasos en la pulpa, etc., dependiendo de la ubicación del fruto dentro del racimo (externos, medios e internos). También se estudian otros rasgos importantes tales como el número de espigas por racimo y el de frutos en desarrollo por espiga que contribuyen o no al rendimiento final de aceite de palma de un racimo determinado.

Aquí, se precisa el contenido y la calidad de aceite de palma en una relación cercana con la arquitectura física del racimo, permitiendo realizar un mejoramiento genético “al interior del racimo”, e incluso “al interior de la pulpa”, con mayor profundidad para el máximo rendimiento.

También estudiamos los frutos partenocárpicos presentes en una proporción significativa de *E. oleifera*, un rasgo natural que se transfiere genéticamente a los híbridos interespecíficos. Estos frutos, completamente pulposos, se desarrollan sin fertilización de polen y, en parte, dependen del origen genético de *E. oleifera* y en la posición a lo largo de las espigas del racimo. Esta investigación abre un potencial camino a variedades completamente partenocárpicas, que pueden representar un aumento del 20 % en la productividad, en comparación con las variedades tradicionales de Tenera. Otra ventaja es que no necesita

polinización asistida para el desarrollo del fruto, tal y como si la requieren los híbridos interespecíficos de *E. oleifera* x *E. guineensis* actuales.

Para identificar los genes que controlan los principales rasgos agronómicos estudiados, los proyectos de OPGP utilizan grandes germoplasmas de *Elaeis* y poblaciones reproductoras de múltiples padres, de varios miles de palmas, cuyos genomas son analizados individualmente con marcadores de ADN de todo el genoma, desarrollados recientemente. El gran tamaño de las poblaciones experimentales garantiza resultados estadísticos altamente precisos, una carencia actual en la mayoría de estudios de reproducción molecular en palma de aceite. Adicionalmente, las poblaciones de reproducción de múltiples padres aumentan la capacidad de muestra y detección de QTL (locus de carácter cuantitativo) (Muranty, 1996; Billo-te *et al.* 2010), y permite estimar de mejor manera sus verdaderos efectos sobre los rasgos agronómicos. Así mismo, varias palmas de referencia de *E. guineensis* y *E. oleifera*, y varias progenies de mapeo genético, relacionan de mejor manera el nuevo conocimiento de OPGP con otra información publicada. Gracias a sus nuevos protocolos estándar de caracterización y a sus experimentos genéticos, los proyectos pueden asociar los valores de rasgos agronómicos con la información del genoma de una forma adecuada, y generar marcadores genéticos/QTL masivamente precisos para la selección asistida por marcadores. Este enfoque facilita las aplicaciones de reproducción hacia el extremo 3' para los socios de OPGP en su proceso paralelo de creación de variedades.

Ejemplos de logros de proyectos OPGP

Desarrollo de recursos genómicos mundiales en el género *Elaeis* (Proyecto A)

Dentro del Proyecto A de OPGP, se generaron más de 2,3 millones de ADN a partir de 49 bibliotecas de transcripción de genes. Estos expresaron secuencias (transcripciones secuenciadas (ADNc) y anotadas) de los genes de *Elaeis* y sus varios alelos expresados en la hoja, meristemo, raíz, pulpa, núcleos, flores femeninas, embriones, gérmenes y polen. Estas bibliotecas derivaron de diferentes tejidos de orígenes

genéticos de *E. guineensis* y *E. oleifera*, así como de varias etapas del desarrollo y condiciones abióticas y bióticas de estrés. En esta etapa, el Proyecto A desarrolló casi 5.000 marcadores intragenéticos de repetición de secuencia única (SSR), más de 16.000 marcadores intragenéticos funcionales de polimorfismo de nucleótido único (SNP), y más de 8.000 SNP GBS (genotipado por secuenciación). Se estableció un mapa de proyección genética en la palma de aceite, conformado por varios mapas genéticos integrados y alineados con toda la secuencia del genoma de la palma de aceite publicado por Singh *et al.* (2013). El mapa de proyección contiene 295 QTL para rasgos productivos y rasgos de calidad y cantidad de aceite de palma. Así se permite el mapeo de cualquier marcador o gen de interés para realizar un análisis eficiente de ubicación conjunta con QTL para la detección de genes candidato relacionados con los principales rasgos agronómicos (Figura 2).

Secuenciación y anotación de genes de los cromosomas de la palma de aceite (Proyecto A_PLUS)

Por último, el Proyecto A_PLUS ha desarrollado su propia secuencia del genoma completo (WGS) de la palma de aceite, utilizando las últimas tecnologías de secuenciación y montaje. Este WGS de alta precisión también contiene las 16 pseudomoléculas que corresponden a los 16 cromosomas de la palma de aceite. Cerca de 38.000 genes han sido pronosticados y anotados en el WGS, por su estructura y función, gracias a los recursos transcriptómicos homólogos del Proyecto A y a modelos de plantas heterólogas (*Arabidopsis thaliana*, *Oryza sativa*, *Zea mays*). Este WGS de OPGP es un complemento altamente valioso al WGS disponible al público de Singh *et al.* (2013) y de Jin *et al.* (2016). Se identificaron las regiones de cromosomas (QTL) que controlan los principales rasgos agronómicos, y se estableció una corta lista de genes candidato para la morfología y calidad de la fruta, la composición de ácido graso del aceite de palma (Montoya *et al.*, 2013, 2014), la resistencia a las enfermedades de *Ganoderma* y marchitamiento, el crecimiento de tallo, tolerancia a estrés hídrico, la eficiencia de absorción de elementos minerales (NPKMg) de las raíces y la eficiencia de la fotosíntesis.

Figura 2. Especies x Rasgos x Sistema de órganos para muestreo de ADNc.

| Órgano Acrónimo | | Especies | | | | | | | | | | SNPs de los genes |
|-------------------------------|--------|----------------------|----------|----------|----------|----------|--------------------|----------|------------|----------|----------|----------------------|
| | | <i>E. guineensis</i> | | | | | <i>E. oleifera</i> | | | | | |
| | | La Mé | Deli | Yangambi | Nigeria | Angola | Brasil | Colombia | Costa Rica | Guyana | Surinam | |
| | | LAME | DELI | YANG | NIFO | ANGO | BRES | COLO | COST | GUYA | SURI | |
| Hoja | F | X | X | X | No usado | X | X | X | X | No usado | X | → X |
| Meristemo | M | X | X | X | No usado | X | X | X | X | X | No usado | → X |
| Raíz | R | X | X | X | No usado | X | X | X | X | X | No usado | → X |
| Librería adicional de órganos | | | | | | | | | | | | |
| Pulpa | P | X | X | X | X | No usado | X | X | X | No usado | X | → X |
| ← Núcleo | K | | X | | | | X | | | | | |
| ← Flores jóvenes | Fl | | X | | | | X | | | | | |
| | Raquis | Ra | No usado | | | | No usado | | | | | |
| ← Embrión | E | | X | | | | X | | | | | |
| ← Semilla | G | | X | | | | X | | | | | |
| ← Polen | Pol | | X | | | | X | | | | | |

Desarrollo en masa de marcadores de ADN ultradensos de todos los cromosomas (Proyecto B)

El Proyecto B, se concentra más en el análisis de los marcadores SNP de todo el genoma, o en la variación alélica de genes candidato de interés agronómico y en sus efectos sobre los rasgos fenotípicos, mediante el mapeo de asociación o la selección genómica a través de la resecuenciación de cromosomas de la palma de aceite *E. oleifera* o por medio del desarrollo de marcadores masivos de ADN (SNP o INDEL), los cuales constituyen una marcación fina y/o intragénica de casi todos los genes de ambas especies de *Elaeis* (millones de marcadores SNP). Se produjo un chip optimizado de ADN Affymetrix Axiom® de 78.000 marcadores SNP optimizados (un SNP polimórfico por ≈ 20 Kb) que se utiliza en los análisis genéticos de alta densidad para apoyar la selección asistida por marcadores.

Un sistema de base de datos central del genoma de la palma con un navegador (Jbrowse), de acceso

privilegiado para los investigadores de OPGP, almacena toda la información sobre los cromosomas de *E. guineensis* y de *E. oleifera*: secuencias de ADN junto con la estructura y función de los genes, secuencias de genes expresada (ADNc), marcadores de ADN, etc. (Figura 3). También se integra información disponible al público.

El método de selección genómica en la palma de aceite del proyecto OPGP

La selección genómica (GS) es un método de selección asistida por marcadores que utiliza marcadores ultradensos de ADN para predecir los valores de reproducción y el desempeño en campo de los genotipos (Meuwissen *et al.*, 2001). OPGP refina este método en la palma de aceite, utilizando conjuntos de datos de rasgos en campo en cerca de 1.500 palmas de varios cruces de reproducción conectados. Estos validan los efectos de los marcadores de ADN (poder de predicción) en los cruces de reproducción objeti-

vo de los socios (diversos orígenes genéticos). De esta manera, será posible operar rápidamente en las especies de palma de aceite una preselección genómica de los padres de híbridos a ser evaluados en el campo y una selección genómica juvenil de las plántulas (en vivero) (Cros *et al.*, 2015).

Con base en los marcadores de ADN más precisos, los datos fenotípicos y las pruebas de campo, este método de GS en la palma de aceite acelerará la creación y selección de variedades mejoradas, según lo simulado anteriormente por Cros *et al.* (2015). Esto logrará un “salto en la selección” en el progreso genético, estimado en 50 % por año para el rendimiento de aceite de palma de variedades puras, es decir, 1,5 % por año en contra del 1 % actual para los mejores esquemas clásicos recíprocos recurrentes.

Adicionalmente, los resultados de los proyectos de OPGP favorecen activamente el cultivo de la palma de aceite en Suramérica, al acelerar la selección asistida por marcadores de híbridos interespecíficos de *E. oleifera* x *E. guineensis* adaptados a las condiciones locales en términos de:

- Mejor calidad del racimo y mayor productividad de aceite de palma, sin polinización asistida.
- Menores costos de producción (crecimiento lento del tallo, sin abscisión y sin frutos de actividad lipasa).
- Resistencia genética a la Pudrición del cogollo, un impedimento importante para el desarrollo de la palma de aceite en Suramérica.
- Aceite de palma alto oleico “similar al de oliva”, de un nicho de alto valor agregado para el mercado comercial mundial.

Figura 3. Visión de genes y marcadores SNP proyectados bajo el Centro de Genoma de Palma de OPGP.



Referencias

- Billotte, N., Jourjon M. F., Marseillac, N., Berger, A., Flori, A., Asmady, H., ... & Mangin, B. (2010). QTL detection by multi-parent linkage mapping in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.). *Theoretical and Applied Genetics*, 120(8), 1673-1687. doi: 10.1007/s00122-010-1284-y
- Cros, D., Denis, M., Sánchez, L., Cochard, B., Flori, A., Durand-Gasselin, T., Nouy, B., ... & Bouvet, J. M. (2015). Genomic selection prediction accuracy in a perennial crop: case study of oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.). *Theoretical and Applied Genetics*, 128(3), 397-410. doi: 10.1007/s00122-014-2439-z.
- Jin, J., Lee, M., Bai, B., Sun, Y., Qu, J., Rahmadsyah, Alfiko, Y., Lim, C.H., & Yue, G. H. (2016). Draft genome sequence of an elite Dura palm and whole-genome patterns of DNA variation in oil palm. *DNA Research*, 23(6), 527-533.

- Meuwissen, T. H., Hayes, B. J., & Goddard, M. E. (2001). Prediction of total genetic value using genome-wide dense marker maps. *Genetics*, 157, 1819-1829.
- Montoya, C., Cochard, B., Flori, A., Cros, D., Lopes, R., Cuéllar, T., ... & Billote, N. (2014). Genetic architecture of palm oil fatty acid composition in cultivated oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) compared to its wild relative *E. oleifera* (H.B.K) Cortes. *PLoS ONE*, 9(5), e95412. doi: 10.1371/journal.pone.0095412.
- Montoya, C., Lopes, R., Flori, A., Cros, D., Cuéllar T., Summo M., ... & Billote, N. (2013). Quantitative trait loci (QTLs) analysis of palm oil fatty acid composition in an interspecific pseudo-backcross from *Elaeis oleifera* (HBK) Cortés and oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.). *Tree Genetics & Genomes*, 9, 1207–1225. doi:10.1007/s11295-013-0629-5.
- Muranty, H. (1996). Power of tests for quantitative trait loci detection using full-sib families in different schemes. *Heredity*, 76, 156-165.
- Singh, R., Ong-Abdullah, M., Low, E. T., Manaf, M. A., Rosli, R., Nookiah, R., ... & Sambanthamurthi, R. (2013). Oil palm genome sequence reveals divergence of interfertile species in old and new worlds. *Nature*, 500(7462), 335-9.

Generación de ideotipos innovadores de palma de aceite mediante biotecnologías*

Generating Innovative Oil Palm Ideotypes through Biotechnologies



ALAIN RIVAL

Director Regional para los Países Insulares del Sudeste Asiático, Centro de Cooperación Internacional en Investigación Agronómica para el Desarrollo.

Regional Director for Countries Island of Southeast Asia, Agricultural Research Centre for International Development (CIRAD)

CITACIÓN: Rival, A. (2019). Generación de ideotipos innovadores de palma de aceite mediante biotecnologías. *Palmas*, 40 (Especial Tomo I), 130-139.

PALABRAS CLAVE: biotecnologías, reproducción, genómica, marcadores moleculares, fenotipos.

KEYWORDS: Biotechnologies, reproduction, genomics, molecular markers, phenotypes.

*Artículo original recibido en inglés y traducido por Carlos Arenas París.

Resumen

Las biotecnologías de la palma de aceite han evolucionado a tal punto que varias de sus aplicaciones se encuentran en la actualidad totalmente integradas y juegan un papel fundamental en las estrategias de reproducción. Los marcadores moleculares se utilizan rutinariamente para verificar y rastrear con precisión la identidad de materiales de siembra de interés agronómico. Estos también son de uso general en la evaluación y control de colecciones vivas de palma de aceite destinadas a la conservación de sus recursos genéticos. La secuenciación y anotación adicional de genomas de la palma de aceite han abierto el camino a la selección genómica, una estrategia de gran interés para los cultivos perennes con ciclos de reproducción largos. La fisiología molecular está respaldada por estudios genómicos que per-

miten el entendimiento profundo de las funciones clave que establecen el crecimiento y desarrollo de la palma de aceite y, por lo tanto, los determinantes básicos de rendimiento de aceite, resistencia a plagas y enfermedades o factores climáticos extremos. La metagenómica suministra información valiosa sobre la salud del suelo en respuesta a varias prácticas agrícolas, dado que se puede analizar la abundancia y composición de todos los organismos vivos en una muestra de suelo determinada, mediante la secuenciación y posterior identificación de todo el ADN presente en esta. Igualmente, es de interés primordial para la exploración de patologías complejas como la Pudrición del cogollo, la cual es de importancia para toda la industria de la palma de aceite en Colombia y Latinoamérica. En los últimos años se han integrado muchas biotecnologías a las estrategias de reproducción dado que la secuenciación del genoma de la palma de aceite ha abierto muchas nuevas oportunidades para la generación de ideotipos adaptados cada vez más solicitados por los usuarios finales.

Abstract

Oil palm biotechnologies are definitely out of infancy, as a number of its applications are now fully integrated and actually play a key role in breeding strategies. Indeed molecular markers are now of everyday routine use in order to accurately check and trace the identity of planting material of agro-nomic interest. Such markers are also of general use in the assessment and management of living collections of oil palm aimed at preserving genetic resources. The sequencing and further annotation of the oil palm genome have paved the way to genomic selection, a strategy with outstanding interest for perennial crops with extremely long breeding cycles. Molecular physiology is now backed by genomic studies that allow the in-depth understanding of key functions that govern the growth and development of the oil palm hence the basic determinants of oil yield, resistance to pest and diseases, or of the resilience to extreme climatic factors. Metagenomics is now able provide valuable information on soil health in response to various agricultural practices as the abundance and composition of all living organisms captured in a given soil sample can be analyzed through the sequencing and further identification of all the DNA present in the sample. Metagenomics is also of paramount interest for the exploration of complex pathologies such as Bud rot, which is of importance for the whole oil palm industry in Colombia and Latin America. In recent years, many biotechnologies have been integrated in breeding strategies. The best is yet to come as the sequencing of the oil palm genome has open many new opportunities for the generation of the adapted ideotypes requested by end users.

Introducción

El desarrollo sostenible del cultivo de la palma de aceite está generando una serie de preguntas por resolver, no solo en los campos tradicionales de la ciencia de las plantas, incluyendo reproducción y biotecnologías (Rival & Jaligot, 2010; Rival & Durand-Gasselin, 2013), sino también en los campos más amplios de la socioeconomía y las ciencias sociales y humanas (Rival, 2013; Rival & Levang, 2014; Sodano *et al.*, 2018). Los ciclos recurrentes de selección han removido con éxito muchos de los alelos “no deseados” de las poblaciones reproductoras, proporcionando así una ganancia genética de 1 % cada año para la palma de aceite (Cochard *et al.*,

2005). Sin embargo, este progreso también podría haber afectado la habilidad de las poblaciones para resistir amenazas ambientales y las ganancias genéticas en el futuro.

La mejora del cultivo de palma de aceite necesitará proceder más allá de la selección de rasgos clásicos, ya que la investigación ómica estudia procesos fisiológicos básicos, tales como la biosíntesis del aceite y el desarrollo del fruto en la palma de aceite (Teh *et al.*, 2016). También necesitamos explorar el suministro y flujo de carbono, las respuestas de la planta al estrés, la captación de nutrientes y el uso del agua a través de una combinación de genética, bioquímica, epigenética e interacción de genes, junto con un análisis de datos fenotípicos más detallado y continuo.

Soh (2018) presentó una revisión exhaustiva del progreso reciente y las líneas de investigación que se han abierto desde la publicación del genoma diploide de 1.8-Gb de la palma de aceite (Singh *et al.*, 2013a). En una revisión dedicada al mejoramiento de la palma de aceite, Forster *et al.* (2017) expusieron una visión a futuro del potencial de las biotecnologías emergentes para el mejoramiento de la palma de aceite, incluyendo nuevos rasgos para la cosecha mecánica y la producción de aceites especiales.

La relación entre las prácticas sostenibles de cultivo y las biotecnologías se ha hecho más robusta con la aparición de la metagenómica como una herramienta precisa para la investigación de la abundancia y biodiversidad de microbioma y el perfil genético funcional de los suelos. Actualmente, se utilizan enfoques de secuenciación metagenómica completa, para investigar los perfiles taxonómicos y funcionales de comunidades microbianas presentes en el agua dulce utilizada para el riego (Meneghini *et al.*, 2017). El desafío es integrar microbiomas beneficiosos de plantas en la producción agrícola (Busby *et al.*, 2017), favoreciendo su crecimiento, la eficiencia del uso de nutrientes, la tolerancia al estrés abiótico y la resistencia a enfermedades como parte de los servicios ambientales.

Las tecnologías de marcadores moleculares están mejorando la eficiencia reproductiva

El trabajo reproductivo realizado por las grandes agroindustrias e instituciones de investigación durante los últimos 50 años ha llevado a un progreso genético constante, que se estima actualmente en 1 % por año (Cocharde *et al.*, 2005). Se espera que en el futuro cercano los rendimientos futuros alcancen, e incluso superen, las 10 toneladas de aceite/hectárea/año (Corley & Tinker, 2016).

Las tecnologías de marcadores moleculares pueden mejorar enormemente la eficiencia de reproducción de la palma de aceite. Los marcadores de ADN y los mapas de ligamiento genético, son recursos esenciales para la selección asistida por marcadores (SAM), con el fin de acelerar el mejoramiento genético. La identificación de EST-SSR que detectan po-

limorfismos en material genético elite proporciona herramientas para estrategias de mejora molecular. Así mismo, el reconocimiento de SSR en transcripciones, en particular aquellas que codifican las proteínas involucradas en la regulación transcripcional y postranscripcional, permitiría conocer los roles funcionales de estas proteínas al revelar cómo los rasgos fenotípicos se segregan con estos marcadores.

Con el fin de identificar el QTL (locus de carácter cuantitativo) para la composición de ácido graso de la palma de aceite, Montoya *et al.* (2014) estudiaron un pseudo retrocruzamiento interespecífico de *Elaeis* de primera generación (*E. oleifera* x *Elaeis guineensis*) x *Elaeis guineensis*. Los órdenes relativamente lineales de los locus mapeados sugirieron la ausencia probable de reordenamientos cromosómicos entre los genomas de *E. oleifera* y *Elaeis guineensis*. La gran cantidad de locus de SSR hipervariable de órdenes lineales relativos conocidos y la información de QTL, hacen que estos recursos sean valiosos para mapear en otros materiales genéticos de *Elaeis*.

Se han construido varios mapas de ligamiento genético utilizando marcadores dominantes y codominantes para facilitar el mapeo de QTL en la palma de aceite. Sin embargo, los primeros no son fácilmente transferibles entre diferentes laboratorios. Lee *et al.*, (2015) desarrollaron un mapa de ligamiento de consenso para la palma de aceite utilizando marcadores codominantes, es decir, microsatélites y SNP, y dos poblaciones genéticas F1 generadas por el cruce de individuos Dura x Pisífera.

Los polimorfismos de nucleótido único (SNP) son variaciones generalizadas de nucleótidos en los genomas, el tipo más abundante de marcador de ADN, y se detectan fácilmente en genomas de alto rendimiento. Al aprovechar la secuencia de genoma de referencia de la palma de aceite obtenida recientemente (Singh *et al.*, 2013b), es posible desarrollar marcadores de ADN de todo el genoma con recursos de información genética. Adicionalmente, los marcadores SNP basados en genes podrían, por sí solos, ser los causantes de rasgos SNP y han sido utilizados para desarrollar mapas de transcripción, análisis de QTL, mapeo de asociación y análisis de sintenia usando genotipado por secuenciación (Pootakham *et al.*, 2015). Empleando tanto SNP como marcadores microsaté-

lite, Bai *et al.* (2018) construyeron un mapa de ligamiento que contiene 10.023 marcadores que abarcan 16 cromosomas. Gan *et al.* (2018) reportaron el primer uso de la plataforma DArTseq para genotipar dos poblaciones de palma de aceite autopolinizadas estrechamente relacionadas. La identificación del marcador Sh demostró la solidez de utilizar la plataforma DArTseq para generar mapas genéticos de alta densidad de la palma de aceite, con una cobertura adecuada del genoma. Tanto los mapas genéticos como los integrados son de interés primordial para el análisis QTL de importantes rasgos de rendimiento, así como para potencialmente apoyar el anclaje de mapas genéticos a secuencias genómicas.

El gen SHELL, la piedra angular del mejoramiento de la palma de aceite

La palma de aceite tiene un gen mendeliano bien caracterizado de importancia agronómica abrumadora: grosor de la cáscara. Este es un rasgo relevante en los programas de mejoramiento genético de la palma de aceite y es la base para la clasificación de variedades en los tipos Dura, Tenera y Pisífera. Es controlado por un locus único, con dos alelos (sh + y sh -), que presentan una expresión codominante.

Billote *et al.* (2005) construyeron un mapa de ligamiento genético de alta densidad basado en microsatélites para la palma de aceite a partir de un cruce entre dos padres heterocigotos, a saber: una palma Tenera de la población La Mé (Lm2T) y una palma Dura de la población Deli (DA10D). Un marco de microsatélites denso y de todo el genoma, además de saturar los polimorfismos en la longitud de fragmentos amplificados (AFLP), permitieron la elaboración de dicho mapa que consiste de 225 microsatélites, 688 AFLP y el locus del gen Sh, que controla la presencia o ausencia de cáscara en el fruto de la palma de aceite. Un marcador aFLP, E-Agg/M-CAA132, fue mapeado a 4,67 cm del locus de Sh. Los 944 marcadores genéticos se distribuyeron en 16 grupos de ligamiento (LG) y cubrieron 1.743 cm. Este fue el primero en la palma de aceite en tener 16 grupos independientes de ligamiento, correspondientes a los 16 pares de cromosomas homólogos de la planta.

Singh *et al.* (2013b) describieron el mapeo e identificación del gen SHELL, encargado de las diferentes formas del fruto en la palma de aceite. Con el uso del mapeo de homocigosidad por secuenciación, encontraron dos mutaciones independientes en el dominio de unión al ADN de un homólogo del gen MADS-box SEEDSTICK (STK, también conocido como AGAMOUS-LIKE 1), que controla la identidad del óvulo y el desarrollo de la semilla en *Arabidopsis thaliana*. El gen SHELL es responsable por el fenotipo Tenera tanto en palmas cultivadas como silvestres del África subsahariana, y Singh *et al.* (2013b) suministraron una explicación genética para el vigor híbrido (o heterosis) del gen único, atribuido a SHELL mediante heterodimerización.

Explorando la base de transcripción de rutas metabólicas

La secuenciación de nueva generación permite el desarrollo de estudios exhaustivos que tienen como objetivo comprender las bases transcripcionales de las rutas metabólicas clave que rigen la fisiología básica de la palma de aceite. Tranbarger *et al.* (2011) examinaron la base transcripcional de los caracteres metabólicos en el mesocarpio de la palma de aceite. Las características morfológicas, celulares, bioquímicas y hormonales definieron las fases clave del desarrollo del mismo. La palma de aceite presenta un modelo original para examinar los procesos de maduración y regulación. Los análisis histoquímicos y mediciones de parámetros celulares, revelaron la expansión y degradación de la membrana celular y la laminilla media durante la maduración en respuesta al etileno (Tranbarger *et al.*, 2017). Los perfiles de transcripción relacionados con la membrana celular sugieren que la transición de síntesis a degradación está bajo control transcripcional durante la maduración, en particular un cambio de la síntesis de celulosa, hemicelulosa y pectina a hidrólisis y degradación.

Descifrando los mecanismos clave de la biosíntesis de ácidos grasos

Los aceites vegetales están conformados predominantemente por triacilglicerol (TAG) que consisten

de glicerol esterificado con tres ácidos grasos (AG). Los diversos usos de los aceites vegetales dependen principalmente de la composición de AG de los TAG. Dussert *et al.* (2013) analizaron tres tejidos de acumulación de TAG de la palma de aceite, mostrando que la regulación transcripcional juega un papel importante en las diferencias considerables en contenido de aceite y composición de AG que existen entre estos tejidos.

Para obtener información sobre los mecanismos que rigen la síntesis del aceite y la composición de ácidos grasos (AG) en el fruto de la palma de aceite, Guerin *et al.* (2016) utilizaron un enfoque multinivel que combina el análisis de coexpresión de genes, la cuantificación de expresión específica a alelos y el análisis multivariable conjunto de datos transcriptómicos y lipídicos en una población retrocruzada interespecífica entre *Elaeis guineensis* y *E. oleifera*, que muestran contenidos de aceite y composiciones de AG contrastantes. La red de coexpresión de genes producida por este trabajo, reveló una estrecha coordinación transcripcional de síntesis de ácidos grasos (SAG) en el plástido con rutas de detección de azúcar, glucólisis plasmidial, almacenamiento transitorio de almidón y de recaptura de carbono. También descubrió una regulación concertada, junto con la SAG, de la transferencia de AG nacientes al retículo endoplasmático, donde se produce el ensamblaje de triacilglicerol, y de la producción de glicerol-3-fosfato, que proporciona la columna vertebral de los triacilgliceroles.

La selección genómica llegó para quedarse

La selección genómica (SG) es un enfoque que utiliza marcadores distribuidos a lo largo de todo el genoma. A diferencia de las estrategias convencionales, la SG no requiere ninguna asociación entre el marcador molecular y el rasgo generado por el mapeo de ligamiento y el estudio de asociación de todo el genoma (GWAS) (Teh *et al.*, 2016). El objetivo de la selección genómica es acelerar la ganancia

La palma de aceite presenta un modelo original para examinar los procesos de maduración y regulación.

genética en los programas de mejoramiento, enfoque particularmente útil para los cultivos perennes como la palma de aceite, los cuales tienen ciclos de reproducción largos y requieren grandes áreas para la ejecución de ensayos genéticos.

Kwong *et al.* (2017) evaluaron los diferentes métodos y sistemas de marcadores disponibles para la selección genómica de la palma de aceite. Claramente, este novedoso enfoque no se ha desarrollado por completo, y el método óptimo para la SG aún está en debate. Los autores valoraron el efecto de diferentes sistemas de marcadores y métodos de modelación para implementar la selección genómica en una familia Dura introgresada derivada de Deli Dura x Nigerian Dura (Deli x Nigerian) con 112 individuos. Los autores concluyeron que, debido a la alta resolución genómica, el uso de SNP de todo el genoma mejoró dramáticamente la eficiencia de la selección genómica para la palma de aceite y lo recomiendan para los programas de mejoramiento genético de Dura. Se encontró que el aprendizaje automático superó ligeramente a los otros métodos, aunque requirió optimizar los parámetros para implementar la selección genómica.

Por otra parte, Cros *et al.* (2017) mostraron que la preselección para componentes de rendimiento utilizando el genotipado por secuenciación (GBS) es la primera aplicación posible de la secuenciación genómica en la palma de aceite, permitiendo aumentar la intensidad de la selección y mejorando el desempeño de los híbridos comerciales. Con la selección genómica, ahora es posible superar el obstáculo del número limitado de individuos evaluados mediante ensayos de progenie tradicionales. El impacto práctico de este estudio fue ilustrado, cuantificando la producción adicional de racimos de los cruces elegidos en el experimento de validación si se hubiera aplicado la preselección genómica en las poblaciones parentales antes de los ensayos de progenie.

La epigenética rige la plasticidad fenotípica

Los enfoques moleculares contribuyen a resolver preguntas importantes respecto a la biología del desarrollo en la palma de aceite. Al respecto, Jaligot *et al.* (2011) describieron estudios sobre la anomalía de la floración epigenética del manto observada en las palmas de aceite producidas *in vitro*, identificando que el desarrollo a gran escala de protocolos de micropropagación basada en embriogénesis somática se ve obstaculizado por la aparición de la variante somaclonal cubierta en proporciones pequeñas pero significativas, lo cual se asemeja a los mutantes florales de clase B de las plantas modelo (Jaligot & Rival, 2015). Las palmas anormales pueden ser estériles y, por lo tanto, improductivas, anulando así cualquier mejora genética potencial hecha en el programa de mejoramiento del que se obtuvieron. Por lo tanto, existe mucho interés en identificar las causas moleculares del fenotipo cubierto, que se ha demostrado es epigenético por naturaleza. Jaligot *et al.* (2011) revisaron el conocimiento y las prioridades actuales para la investigación futura de este complejo pero desafiante fenómeno, dirigido a factores moleculares de particular interés tales como genes MADS-box y elementos transponibles, debido a su participación en los procesos regulatorios relacionados en las plantas modelo.

Shearman *et al.* (2013) realizaron una secuenciación de ARN en muestras de flores en desarrollo y frutos de palmas de aceite normales y cubiertas, para caracterizar sus transcriptomas. Estos autores también estudiaron la información de expresión para todas las transcripciones en las muestras de flores y

frutos normales y cubiertos, evidenciando así que muchos genes se expresan de forma diferente, incluyendo varios de rutas que pueden ser la causa del fenotipo cubierto si se interrumpen, por ejemplo, genes involucrados en las respuestas hormonales primarias, la replicación y reparación de ADN, la remodelación de cromatina y un gen involucrado en el ARN.

El fenotipo cubierto se asoció con la hipometilación del ADN de un retrotansposón LINE (elemento nuclear intercalado largo) (Karma) presente en el intrón del gen de clase B DEFICIENS, que lleva a un empalme alternativo y a la terminación prematura de la transcripción (Ong-Abdullah *et al.*, 2015). Este enfoque basado en el epigenoma, confirmó los resultados anteriores sobre el origen epigenético de la variación somaclonal cubierta, que había sido descifrada previamente por Jaligot *et al.* (2014) con base en la regulación epigenética de un gen candidato MADS-box (Adam *et al.*, 2007, 2011) mediado por la metilación del ADN.

Las promesas de la ingeniería genética

El principal fin de la investigación en biotecnología de la palma de aceite ha sido aumentar el ácido oleico en el mesocarpio. Otros objetivos incluyen el ácido esteárico, el palmitoleico y el ricinoleico, licopeno (carotenoide) y plásticos biodegradables. Sobre el tema, se han reportado logros significativos para los estudios bioquímicos, el aislamiento de genes útiles de la palma de aceite y la caracterización de promotores importantes. Varios constructos de transformación para diversos productos específicos, fueron producidos con éxito utilizando genes y promotores aislados de la palma de aceite. Estos constructos se transformaron en cultivos embriogénicos de palma de aceite, mientras que la regeneración de palma de aceite transgénica que alberga los genes útiles está progresando (Parveez *et al.*, 2015).

La ingeniería genética continúa siendo un gran desafío en la palma

El principal fin de la investigación en biotecnología de la palma de aceite ha sido aumentar el ácido oleico en el mesocarpio. Otros objetivos incluyen el ácido esteárico, el palmitoleico y el ricinoleico, licopeno (carotenoide) y plásticos biodegradables.

de aceite. El bombardeo de partículas (Parveez *et al.*, 2015) y la transformación mediada por *Agrobacterium* (Yenchon y Te-chato, 2012) son ineficientes y, a menudo, producen palmas quiméricas y escapes. Los protoplastos son útiles como objetivos para la ingeniería genética porque son totipotentes, y se pueden evitar quimeras regenerando plantas transgénicas a partir de células únicas. Por lo tanto, los enfoques novedosos para la transformación de los protoplastos de la palma de aceite (Masani *et al.*, 2014) podrían ofrecer una estrategia nueva y eficiente.

La disponibilidad de un método confiable para que los investigadores transformen y regeneren las palmas de aceite transgénicas de forma eficiente, impulsará drásticamente la investigación en la expresión y función de genes dado que, hasta el momento, se deben realizar experimentos clave de validación sobre plantas modelo como *Arabidopsis* o arroz. Adicionalmente, la aceptación del público, especialmente en Europa, es un paso clave para la adopción global de cultivos transgénicos, y la palma de aceite no sería una excepción. Paradójicamente, siendo que actualmente el aceite de palma es el único no modificado genéticamente en el mercado, es probable que el desarrollo de palmas transgénicas tenga que enfrentar grandes problemas de comercialización, además de las controversias sobre su producción sostenible (Rival & Levang, 2014).

Metagenómica para la palma de aceite

Con el creciente interés por integrar los servicios ambientales al manejo sostenible del cultivo, han surgido una serie de preguntas por resolver relacionadas con el impacto de las prácticas de cultivo en la salud del suelo, particularmente por la biodiversidad.

Los enfoques en metagenómica pueden suministrar información valiosa sobre la salud del suelo en respuesta a varias prácticas agrícolas, considerando que estos se encargan de analizar la abundancia y composición de todos los organismos vivos en una muestra de suelo determinada mediante la secuenciación y posterior identificación de todo el ADN presente en la misma. Las interacciones entre genotipo de planta, medioambiente y microbioma, son desafíos prácticos para la integración exitosa de

microbiomas beneficiosos a los programas de mejoramiento y manejo agrícola. De hecho, el genotipo de la planta y los parámetros ambientales (tanto bióticos como abióticos) determinan los fenotipos de la planta, y los rasgos fenotípicos influyen en el subconjunto de microbios de la comunidad ambiental. Los métodos de manejo de cultivos (labranza, abono, riego, etc.) afectan principalmente el rendimiento, alterando las dinámicas de las interacciones genotipo-ambiente-microbioma, y pueden modificar el microbioma del cultivo directamente (Busby *et al.*, 2017). La metagenómica también es de interés primordial para la exploración de patologías complejas como la Pudrición del cogollo, que es de importancia para toda la industria de la palma de aceite en Colombia y Latinoamérica.

Conclusión

El lanzamiento de la secuencia del genoma de la palma de aceite por parte de Singh *et al.* (2013a) ha generado grandes avances en su biotecnología. Incluso si un conocimiento y recursos moleculares considerables ya estaban disponibles antes de esta fecha (Rival & Jalingot, 2010), la disponibilidad de la secuencia del genoma aceleró varios proyectos de investigación que van desde la selección genómica hasta descifrar los componentes clave del rendimiento, tales como la proporción de sexos o la síntesis de aceite. Los hallazgos en áreas de vanguardia de la biotecnología contribuirán al cultivo sostenible de la palma de aceite, únicamente si el conocimiento es divulgado por la comunidad de investigadores y diseminado rápidamente como una innovación útil a los grupos de interés.

Las herramientas biotecnológicas y el mejoramiento molecular llegaron para quedarse, aunque no son indispensables para el mejoramiento de la palma de aceite. Actualmente, están cerrando la brecha entre la genética de cultivos de plantación y los avances biotecnológicos transversales que surgen de plantas modelo, anuales y perennes. Si bien no hay duda de que las herramientas biotecnológicas continuarán mejorando, el éxito final de su aplicación yace en la realización de pruebas de campo dedicadas (Soh, 2018) a suministrar datos confiables y a la validación de sus usos tanto en el mejoramiento como en la agronomía.

Referencias

- Adam, H., Jouannic, S., Orioux, Y., Morcillo, F., Richaud, F., Duval, Y., & Tregear, J. W. (2007). Functional characterization of MADS box genes involved in the determination of oil palm flower structure. *Journal of Experimental Botany*, 58, 1245-1259.
- Adam, H., Collin, M., Richaud, F., Beulé, T., Cros, D., ... & Tregear, J. W. (2011). Environmental regulation of sex determination in oil palm: current knowledge and insights from other species. *Annals of Botany*, 108, 1529-1537.
- Bai, B., Wang, L., Zhang, Y. J., Lee, M., Rahmadsyah, R., ... & Yue, G. H. (2018). Developing genome-wide SNPs and constructing an ultrahigh-density linkage map in oil palm. *Scientific Reports*, 691, 1-7.
- Billote, N., Marseillac, N., Risterucci, A. M., Adon, B., Brottier, P., ... & Charrier, A. (2005). Microsatellite-based high-density linkage map in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.). *Theor Appl Genet.*, 110(4), 754-65.
- Busby, P. E., Soman, C., Wagner, M. R., Friesen, M. L., Kremer, J., ... & Dangl, J. L. (2017). Research priorities for harnessing plant microbiomes in sustainable agriculture. *PLOS Biology*, 15(3), e2001793.
- Cochard, B., Amblard, P., & Durand-Gasselin, T. (2005). Oil palm genetic improvement and sustainable development. *OCL*, 12(2): 141-147.
- Corley, R. H. V., & Tinker, P. B. (2016). The oil palm (5th Edition). London: Wiley & Sons Ltda.
- Cros, D., Bocs, S., Riou, V., Ortega-Abboud, E., Tisné, S., ... & Durand-Gasselin, T. (2017). Genomic preselection with genotyping-by-sequencing increases performance of commercial oil palm hybrid crosses. *BMC Genomics*, 18, 839.
- Dussert, S., Guerin, C., Andersson, M., Joët, T., Tranbarger, T. J., Pizot, M., & Morcillo, F. (2013). Comparative transcriptome analysis of three oil palm fruit and seed tissues that differ in oil content and fatty acid composition. *Plant Physiology*, 162, 1337-1358.
- Forster, B. P., Sitepu, B., Setiawati, U., Kelanaputra, E. S., Nur, F., ... & Caligari, P. D. S. (2017). Oil Palm (*Elaeis guineensis*). In: *Genetic Improvement of Tropical Crops*. Cham: Springer.
- Gan, S. T., Wong, W. C., Wong, C. K., Soh A. C., Kilian, A., ... & Mayes, S. (2018). High density SNP and DArT-based genetic linkage maps of two closely related oil palm populations. *Journal of Applied Genetics*, 59, 23.
- Guerin, C., Joet, T., Serret, J., Lashermes, P., Vaissayre, V., Agbessi, M. D., & Durand-Gasselin, T. (2016). Gene coexpression network analysis of oil biosynthesis in an interspecific backcross of oil palm. *The Plant Journal*, 87, 423-441.
- Kwong, Q. B., Teh, C. K., Ong, A. L., Chew, F. T., Mayes, S., Kulaveerasingam, H., & Harikrishna, J. A. (2017). Evaluation of methods and marker Systems in Genomic Selection of oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.). *BMC Genetics*, 18(107).
- Jaligot, E., Adler, S., Debladis, E., Beulé, T., Richaud, F., Ilbert, P., Finnegan, E.J., & Rival, A. (2011). Epigenetic imbalance and the floral developmental abnormality of oil palm. *Annals of Botany*, 108, 1453-1462.
- Jaligot E., & Rival, A. (2015). Epigenetic variations: a trade-off between genome stability and phenotypic plasticity. In: Al-Khayri, J. M., Jain, S. M., and Johnson, D. V. (Eds.). *Advances in Plant Breeding Strategies: Breeding, Biotechnology and Molecular Tools*. London: Springer.

- Jaligot, E., Hooi, W. Y., Debladis, E., Richaud, F., Beulé, T., Collin, M., Agbessi, M. D. T., ... & Rival, A. (2014). DNA methylation and transcriptional activity of the EgDEF1 gene and neighboring retrotransposons in mantled somaclonal variants of oil palm. *PLoS One*, 9, e91896.
- Lee, M., Xia, J. H., Zou, Z., Ye, J., Alfiko, Y., Jin, J., & Wong, L. (2015). A consensus linkage map of oil palm and a major QTL for stem height. *Scientific Report*, 5, 8232.
- Masani, M. Y. A., Noll, G. A., Parveez, G. K. A., & Sambanthamurthi, R. (2014). Efficient Transformation of Oil Palm Protoplasts by PEG-Mediated Transfection and DNA Microinjection. *PLoS ONE*, 9(5), e96831.
- Meneghini, A. K., Nielsen, S., Varani, A. M., Thomas, T., & Carareto-Alves, L. M. (2017). Metagenomic analysis of soil and freshwater from zoo agricultural area with organic fertilization. *PLoS ONE*, 12(12), e0190178.
- Montoya, C., Cochard, B., Flori, A., Cros, D., Lopez, R., ... & Billote, N. (2014). Genetic Architecture of Palm Oil Fatty Acid Composition in Cultivated Oil Palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) Compared to Its Wild Relative *E. oleifera* (H.B.K) Cortés. *PLOS ONE*, 9(6), e101628.
- Ong-Abdullah, M., Ordway, J. M., Jiang, N., Ooi, S.-E., Kok, S.Y., Sarpan, N., & Azimi, N. (2015). Loss of Karma transposon methylation underlies the mantled somaclonal variant of oil palm. *Nature*, 525, 533-537.
- Parveez, G. K. A., Bahariah, B., Ayub, N. H., Masani, M. Y., Rasid, A., ... & Ishak, Z. (2015). Production of polyhydroxybutyrate in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) mediated by microprojectile bombardment of PHB biosynthesis genes into embryogenic calli. *Front Plant Sci.*, 6, 598.
- Pootakham, W., Jomchai, N., Ruang-areerate, P., Shearman, J.R., Sonthirod, C., Sangsrakru, D., Tragoonrung, S., & Tangphatsornruang, S. (2015). Genome-wide SNP discovery and identification of QTL associated with agronomic traits in oil palm using genotyping-by-sequencing (GBS). *Genomics*, 105, 288-295.
- Rival, A., & Jaligot, E. (2010). Oil palm biotechnologies are definitely out of infancy. *Oleagineux Corps gras Lipides*, 17(6), 368-374.
- Rival, A., & Durand-Gasselin, T. (2013). Genotype and phenotype. Exploring the breeder's black box. En *Memorias XVII Conferencia Internacional sobre Palma de Aceite*. Cartagena, Colombia, 25-28 de septiembre de 2012.
- Rival, A., & Levang, P. (2014) *Palms of controversy: oil palm and development challenges*. Bogor: Cifor.
- Shearman, J. R., Jantasuriyarat, C., Sangsrakru, D., Yoocha, T., Vannav-ichit, A., Tragoonrung, S., & Tangphatsornruang, S. (2013) Transcriptional analysis of normal and mantled developing oil palm flower and fruit. *Genomics*, 101, 306-312.
- Singh, R., Low, E. T. L., Ooi, L. C. L., Ong-Abdullah, M., Chin, T.N., Nagappan, J., Nookiah, & R. (2013a). The oil palm SHELL gene controls oil yield and encodes a homologue of SEEDSTICK. *Nature*, 500, 340-344.
- Singh, R., Ong-Abdullah, M., Low, E. T., Manaf, M. A., Rosli, R., Nookiah, R., Ooi, L. C., & Ooi, S. E. (2013b). Oil palm genome sequence reveals divergence of interfertile species in old and new worlds. *Nature*, 500, 335-339.
- Soh, A. C., Mayes, S., & Roberts, J. A. (Ed.). (2017). *Oil Palm Breeding: Genetics and Genomics*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press.
- Sodano, V., Rivero, R., & Scafuto, F. (2018). Investigating the intention to reduce palm oil consumption. *Calitatea*, 19(S1), 500-505.

- Soh, A. C. (2018). Applications and challenges of biotechnology in oil palm breeding. IOP Conf. Series: *Earth and Environmental Science*, 183, 012002.
- Teh, C. K., Ong, A. L., Kwong, Q. B., Apparow, S., Chew, F. T., Mayes, S., ... & Kulaveerasingam, H. (2016). Genome-wide association study identifies three key loci for high mesocarp oil content in perennial crop oil palm. *Scientific Reports*, 6, 19075.
- Tranbarger, T. J., Dussert, S., Joët, T., Argout, X., Summo, M., Champion, A., & Cros, D. (2011). Regulatory mechanisms underlying oil palm fruit mesocarp maturation, ripening, and functional specialization in lipid and carotenoid metabolism. *Plant Physiology*, 156, 564-584.
- Tranbarger, T. J., Fooyontphanich, K., Roongsattham, P., Pizot, M., Collin, M., Jantasuriyarat, C., Suraninpong, P., & Tragoonrung, S. (2017). Transcriptome Analysis of Cell Wall and NAC Domain Transcription Factor Genes during *Elaeis guineensis* Fruit Ripening: Evidence for Widespread Conservation within Monocot and Eudicot Lineages. *Frontiers in Plant Science*, 8, 603.
- Yenchon, S., & Te-chato, S. (2012). Effect of bacteria density, inoculation and co-cultivation period on *Agrobacterium*-mediated transformation of oil palm embryogenic callus. *Journal of Agricultural Technology*, 8, 1485-1496.

La polinización artificial con reguladores de crecimiento incrementa la producción de aceite en híbridos interespecíficos OxG

Artificial Pollination with Plant Growth Regulators
Increases Oil Yields in Interspecific Hybrids OxG



HERNÁN MAURICIO ROMERO ANGULO
Director de Investigación y
Coordinador del Programa de Biología y
Mejoramiento Genético,
Cenipalma. Profesor Asociado,
Universidad Nacional de Colombia.
Research Director and Coordinator of
the Biology and Breeding Program,
Cenipalma; Associate Professor,
National University of Colombia

CITACIÓN: Romero, H. M. (2019). La polinización artificial con reguladores de crecimiento incrementa la producción de aceite en híbridos interespecíficos OxG. *Palmas*, 40 (Especial Tomo I), 140-141.

PALABRAS CLAVE: polinización artificial, reguladores de crecimiento, híbrido OxG, palma de aceite.

KEYWORDS: Assisted pollination, growth regulators, OxG hybrid material, oil palm.

Resumen

El manejo eficazLos híbridos interespecíficos OxG son producidos de cruzar palmas americanas *Elaeis oleifera* con polen de palmas africanas *Elaeis guineensis*. En los últimos años las siembras de los híbridos se han incrementado debido a su resistencia a la enfermedad Pudrición del cogollo, la cual es la mayor amenaza para la agroindustria de la palma en Latinoamérica. Debido a problemas de fertilidad, los híbridos interespecíficos OxG deben ser polinizados manualmente utilizando polen derivado de plantas de *E. guineensis*. Esta práctica de polinización es costosa, y si no se hace de manera adecuada y en el

momento preciso en que las flores están receptivas (antesis), la conformación del racimo es deficiente, con bajo número de racimos formados, un *fruit set* pobre y bajo contenido de aceite.

Desde hace más de cinco años, Cenipalma inició una investigación tendiente a utilizar reguladores de crecimiento vegetales para poder mejorar el proceso de polinización asistida, aprovechando la condición natural de los híbridos OxG en los que se producen frutos partenocárpicos (sin semilla) con buen contenido de aceite. En este trabajo se presentan los resultados de esta investigación. Inicialmente, la forma como se llegó a la conclusión de que las auxinas eran los mejores reguladores de crecimiento. Luego, se presentan los resultados de la manera sistemática como se logró establecer la dosis, el estadio fenológico, la forma y frecuencia de aplicación del regulador de crecimiento ácido 1-naftalenacético (ANA) para llegar a una tecnología denominada “polinización artificial” a través de la cual se logra incrementar el número de racimos formados por hectárea (se alcanza el 95 % de formación de los racimos potenciales), manteniendo el peso medio del racimo, con *fruit set* cercano al 100 %. Adicionalmente se logran incrementos en la producción de aceite de más del 25 % (entre 5 y 8 puntos porcentuales de incremento en TEA), reduciendo el uso de mano de obra.

De esta manera, con una buena fertilización y utilizando la tecnología de la polinización artificial desarrollada por Cenipalma, niveles de producción de aceite de 8 y más toneladas ha⁻¹ año⁻¹ dejan de ser una ilusión y se convierten en una meta alcanzable en el corto plazo para los cultivadores de híbridos interespecíficos OxG.

Abstract

Interspecific hybrids OxG result from crossing American *Elaeis oleifera* oil palm with pollen from African *E. guineensis* oil palm. In the last few years, hybrid planting has increased due to its resistance to bud rot. This disease is the major threat to Latin American oil palm industries. Due to fertility issues, interspecific hybrids OxG must be pollinated manually with pollen from *E. guineensis* palms. This is a costly pollination practice. If it is not done properly and at the precise time when inflorescences are receptive (anthesis phase), bunch formation, fruit set, and oil content will be poor.

Over five years ago, Cenipalma started research on the use of plant growth regulators to improve the assisted pollination process, taking advantage of the natural properties of OxG hybrids that produce parthenocarpic (seedless) fruit with good oil content. This paper shows the results of this research. First, we will present how auxins were identified as the best plant growth regulators. Subsequently, we will present results on the systematic method used to establish the appropriate dosage. We will also present the phenological stage, the form and frequency of application of 1-naphthaleneacetic acid (NAA) growth regulator with the purpose of conducting “artificial pollination” to increase the number of bunches formed per ha (95% formation of potential bunches), while keeping medium bunch weight and almost 100% fruit set. Additionally, oil yields increased by over 25% (OER increased 5 to 8 percentage points) which reduces labor requirements.

Thus, with good fertilization and the use of Cenipalma's artificial pollination technology, palm oil production levels of 8 or more tons ha⁻¹ year⁻¹ are no longer a dream and become an attainable short-term goal for interspecific hybrid OxG growers.

El rol del reciclaje de la biomasa de palma de aceite en la salud del suelo de las plantaciones

The Role of Oil Palm Biomass Recycling on Soil Health in Oil Palm Plantations



JEAN-PIERRE CALIMAN

Investigador del Instituto de
Investigación Pt SMART
Researcher of Pt SMART Research
Institute, Indonesia

CITACIÓN: Caliman, J. P. (2019). El rol del reciclaje de la biomasa de palma de aceite en la salud del suelo de las plantaciones. *Palmas*, 40 (Especial Tomo I), 142-143.

PALABRAS CLAVE: biomasa, palma de aceite, suelos.

KEYWORDS: Biomass, oil palm, soils.

Resumen

El cultivo de palma de aceite es único dentro del campo de la agricultura por cuanto produce enormes cantidades de biomasa, la cual se puede reciclar directamente en la plantación con el fin de mantener la calidad de los suelos o incluso mejorarla. Los racimos de fruto vacíos frescos, las hojas y los troncos son los principales componentes de esta biomasa y se reciclan en diversas escalas de tiempo y espacio: se pueden aplicar en toda la plantación durante todo el año (pecíolos) o en el momento de la renovación del cultivo o en algunas partes del plantación y con una frecuencia de aplicación anual o de cada dos años.

La aplicación de racimos vacíos frescos modifica la mayor parte de los parámetros edáficos, entre otros el pH del suelo, el potasio intercambiable, el nivel de saturación de aluminio, etc., con patrones específicos que están en línea con la descomposición cinética de los racimos vacíos y la liberación de nutrientes. Por ejemplo, después de la aplicación de racimos vacíos, el pH del suelo es mayor durante 18 meses, comparado con la condición inicial. El potasio intercambiable aumenta drásticamente a los pocos días de la aplicación de racimos vacíos y este efecto positivo todavía se puede medir a los 18 meses. La saturación de Al disminuye rápidamente y su efecto también es relativamente duradero.

El reciclaje de las hojas de cosecha o poda modifica las características físicas y químicas de los suelos cuando estas se apilan en paleras en las interlíneas o si se distribuyen en las calles de cosecha donde pueden reducir la escorrentía y la erosión. Estos impactos también se cuantificaron en nuestro experimento de campo: la distribución sistemática de hojas en las interlíneas reduce la escorrentía de las aguas lluvias más del 25 %, inclusive inferiores al 5 %. Posteriormente, la pérdida de suelos por la erosión se reduce alrededor de 60 %, dependiendo de la altura de la pendiente del terreno. Por lo tanto, la pérdida de nutrientes disminuye considerablemente, lo que genera mayor eficiencia de los fertilizantes. Se han tomado mediciones similares cuando se aplican racimos vacíos frescos en el suelo. Presentaremos los resultados relacionados con la reducción de la escorrentía, la erosión y la pérdida de nutrientes.

El reciclaje de la biomasa de palma de aceite contribuye a mejorar la fertilidad física. Mejora tanto la tasa de infiltración de aguas lluvias como la posterior humedad del suelo. También registramos una reducción de la resistencia del suelo a la penetración, al igual que una mejora de la estabilidad de agregados del suelo.

La investigación de la biología del suelo registró varios parámetros representativos de la actividad biológica del suelo. Por ejemplo, la medición de la actividad de alimentación de la fauna edáfica utilizando el sistema de prueba de láminas-cebo muestra el impacto positivo de las aplicaciones de racimos vacíos, al igual que la distribución foliar en las interlíneas. Compartiremos el impacto en la población de lombrices de tierra, al igual que en los insectos.

Finalmente, la presentación mostrará los resultados del impacto sobre la producción de las palmas cuando se utilizan racimos vacíos, tanto frescos como después del compostaje, sobre el rendimiento de la palma.

Abstract

Oil palm cultivation is relatively unique in agriculture since it produces a huge amount of biomass which can be recycled directly in plantation to maintain or even improve the quality of soils. Empty fruit bunches (EFB), fronds and trunks are the main components of this biomass. They are recycled at different scale of time and space: either over the whole plantation, all along the year (fronds), or at replanting time (trunks), or on portions of the plantation with a yearly or every two years applications frequency.

In this paper, we present results on the impact of this biomass recycling, mainly the EFB, applied fresh from the mill or after composting, but also of the fronds, on several components of soil health, i.e. the chemical, physical and biological characteristics. EFB fresh applications modify most of the soil parameters including, but not only, soil pH, soil K exchangeable, soil Al saturation level, etc., with specific patterns in line with the kinetic of the decomposition of the EFB and the release of nutrients. For example, the pH of the soil after EFB application is higher during more than 18 months compared to the initial situation. Soil exchangeable potassium increases dramatically within a few days after EFB spreading, and this positive effect is still measurable after 18 months. Soil Al saturation decreases quickly, with also a relatively long lasting effect.

Frond recycling, at harvesting and pruning, modifies the chemical and physical characteristics of soils whether they are applied on heaps between palms in dedicated inter-rows, or whether they are spread on harvesting paths where they can reduce run-off and erosion. These impacts have also been quantified in our field experiment: the systematic distribution of fronds in inter-rows reduces rain water run-off by more than 25%, even on a 5% gentle slopes. Subsequently, soil loss through erosion is reduced by around 60 % depending of the slope intensity of the terrain. Consequently the loss of nutrients is considerably reduced, resulting in a higher fertiliser efficiency. Similar measurements have been done when applying fresh EFB to the soil. Results of the reduction of run-off, erosion and nutrient loss will be presented.

The recycling of the oil palm biomass contributes to improve the soil physical fertility. Rainwater infiltration rate and subsequently soil humidity are improved. We have also recorded a reduction of the soil resistance to penetration, as well as an improvement of the soil aggregate stability.

Soil biological investigation through several parameters representative of the soil biological activity have been recorded. For example, the measurement of the soil fauna feeding activity using bait-lamina test system shows the positive impact of EFB applications as well as frond spreading in inter-rows. The impact on earthworm population as well as on insects will be shared.

Finally the presentation will show results of the impact on the production of the palms, when using EFB, fresh or after composting, on the yield performance of the palms.

Indicadores de rendimiento de nutrientes en palma de aceite*

Nutrient Yield Indicators in Oil Palm



THOMAS OBERTHÜR

Instituto Internacional para la Nutrición de Plantas, IPNI, Programa del Sudeste Asiático. International Plant Nutrition Institute, Southeast Asia Program

AUTORES: T. Oberthür, Instituto Internacional para la Nutrición de Plantas, IPNI, Programa del Sudeste Asiático, R. Norton, Facultad de Veterinaria y Ciencias Agrícolas, Universidad de Melbourne (Australia), H. Sugianto, IPNI, Y. L. Lim, IPNI, C. Donough, IPNI, P.V.V. Ho, Wilmar International, S. Pramananda, Wilmar International, G. Singh, Wilmar International, S. P. Kam, IPNI.

CITACIÓN: Oberthür, T., Norton, R., Sugianto, H., Lim, Y. L., Donough, C., ... & Kam, S. P. (2019). Indicadores de rendimiento de nutrientes para palma de aceite. *Palmas*, 40(Especial Tomo I), 144-157.

PALABRAS CLAVE: equilibrio parcial de nutrientes, productividad por factor parcial, eficiencia de fertilizante, efectividad de fertilizante, evaluación comparativa.

KEYWORDS: Partial nutrient balance, partial factor productivity, fertilizer efficiency, fertilizer effectiveness, benchmarking.

*Artículo original recibido en inglés y traducido por Carlos Arenas París.

Resumen

El manejo eficaz y eficiente de los fertilizantes es una parte importante para lograr rendimientos sostenibles en la palma de aceite, tanto a corto como a largo plazo. Si bien las decisiones sobre su manejo se toman rutinariamente como parte de la estrategia agronómica general, es preciso contar con una manera de monitorear el rendimiento para poder tomar decisiones futuras a medida que las condiciones biofísicas y económicas cambian. El uso de un conjunto de indicadores de rendimiento de nutrientes (NPI, por su sigla en inglés) puede proporcionar información a los administradores para dirigir las acciones futuras, así como dar retroalimentación sobre el desempeño comparativo de grupos al interior de la plantación. Utilizando los registros de plantaciones se puede derivar una selección de NPI, incluyendo la productividad por factor parcial (PPF por su sigla en inglés; la cantidad de producto por cada unidad de nutriente fertilizante empleado), el equilibrio

parcial de nutrientes (PNB, por su sigla en inglés; la porción de nutrientes eliminados del producto, en comparación con la cantidad de nutriente fertilizante usada) y la eficiencia agronómica (AE, por su sigla en inglés; el aumento en el rendimiento, en comparación con la cantidad de nutriente fertilizante utilizada). De una plantación comercial en Borneo, con una media de rendimiento de $24,0 \pm 4,6$ t RFF/ha, la media de PPF-N fue de 174 ± 39 kg RFF/kg N, la de PPF-P de 750 ± 258 kg RFF/kg P y la de PPF-K de 85 ± 19 kg RFF/kg K. La media de PNB-N fue de $0,53 \pm 0,12$, la de PNB-P de $0,29 \pm 0,10$ y la de PNB-K fue de $0,33 \pm 0,07$. Estos datos se pueden desagregar para identificar los indicadores de desempeño por grupo de manejo de suelos y edad de la palma. Igualmente, los NPI se pueden monetizar considerando la relación entre el valor del producto y el costo del fertilizante. Aunque esta evaluación comparativa del desempeño de la plantación proporciona información a los administradores para el manejo de los nutrientes, es necesario realizar trabajos adicionales para cuantificar de mejor manera la relación entre el momento de suministro y el rendimiento, y el destino de los nutrientes no eliminados, como en el tejido de la palma o en el suelo. Así se puede obtener una mejor apreciación de la función de respuesta de frecuencia para la palma de aceite.

Abstract

Effective and efficient fertilizer management is an important part of achieving sustainable yields in oil palm in both the short and long term. While decisions on the management of fertilizers are made routinely as part of the overall agronomic strategy, it is important to have a way to monitor nutrient performance so future decisions can be made as biophysical and economic conditions change. The use of a suite of nutrient performance indicators (NPI) can provide plantation managers with information to guide future management, as well as provide feedback on comparative performance of groups within the plantation. Using plantation records, a selection of NPI's may be derived, including partial factor productivity (PPF, the amount of product for each unit of fertilizer nutrient used), partial nutrient balance (PNB, the amount of nutrient removed in the product compared to the amount of fertilizer nutrient used) and agronomic efficiency (AE, the increase in yield compared to the amount of fertilizer nutrient used). From a commercial plantation in Kalimantan, with a mean yield of 24.0 ± 4.6 t FFB/ha, the mean PPF-N was 174 ± 39 kg FFB/kg N, mean PPF-P was 750 ± 258 kg FFB/kg P and mean PPF-K was 85 ± 19 kg FFB/kg K. Mean PNB-N was 0.53 ± 0.12 , mean PNB-P was 0.29 ± 0.10 and mean PNB-K was 0.33 ± 0.07 . These data can be disaggregated to identify performance indicators by soil management group, palm age, year and/or management group. As well, the NPI can be monetized by considering the ratio of value of the product to the cost of the fertilizer. Such benchmarking of plantation performance can provide managers with input to manage nutrients although there is further work to be undertaken to better quantify the relationship between the timing of nutrient supply to yield, the fate of nutrients not removed such as in palm tissue or in soil, and a better appreciation of the rate response function for oil palm.

Introducción

Se estima que el 95 % del área plantada con palma de aceite en el Sudeste Asiático está conformada por suelos de fertilidad subóptima (Mutert, 2001), y las respuestas al uso de fertilizantes ha sido demostrada por ensayos en campo (Kee y Goh, 2006). Entre 1951 y 1991 (Davidson, 1993), las prácticas mejoradas de fertilizantes en Malasia han contribuido a una mejora del 30 % en el rendimiento del aceite de palma (de 1,3

a 5,4 t/ha). Igualmente, el fertilizante es un insumo costoso para la producción de palma de aceite en el Sudeste Asiático: el consumo total de N, P, K y Mg es de 22-35 kg/año/t producida de RFF (Ng & Thamboo, 1967; Ng *et al.*, 1968), y reemplazar estos nutrientes eliminados significa que el fertilizante representa más de 50 % de los costos de un cultivo (Veloo *et al.*, 2013).

El uso del fertilizante es una parte importante del manejo de la plantación de palma de aceite, y el despliegue estratégico de nutrientes afecta su desempe-

ño físico, financiero y ambiental. En consecuencia, es primordial contar con una revisión constante de la utilización de este como parte de una estrategia comercial de planeación-acción-monitoreo-revisión. Por lo general, la planeación se realiza a escala de la finca y luego en bloques con base en un presupuesto financiero, quizás con pruebas de suelos y plantas, y considerando el rendimiento del cultivo. La acción o la implementación del programa de fertilizantes, suele realizarse sin una medición directa de la respuesta en el rendimiento o la rentabilidad del mismo. Dado que los términos del comercio entre los costos del fertilizante y los precios del aceite de palma cambian, ajustar los planes de fertilizante requiere monitorear un rango de respuestas relacionadas con formas de evaluar la eficiencia del uso de nutrientes (NUE, por su sigla en inglés).

Los cultivos anuales tienen estrategias bien definidas para evaluar los NUE (Fixen *et al.*, 2015). A

partir de la información experimental y de campo se puede derivar un rango de indicadores de rendimiento de nutrientes (NPI) para ayudar a guiar los programas de fertilizantes (Dobermann, 2007). La Tabla 1 presenta un resumen de algunos NPI típicos, e indica cómo pueden derivarse y algunos aspectos de su interpretación. En una plantación comercial de palma de aceite, se registran los datos de rendimiento tomado¹ y el uso de fertilizante a nivel de bloque, los que pueden utilizarse en métodos simples y robustos como una aproximación de los beneficios adquiridos por el uso de fertilizante. Aunque la Tabla 1 presenta un rango de opciones simples, ningún indicador por sí solo representa la complejidad del desempeño de los nutrientes al interior o entre áreas o cultivos o actividades de manejo (Norton *et al.*, 2015). No obstante, en conjunto, junto con otros datos, se pueden combinar para monitorear y comparar las áreas de interés.

Tabla 1. Indicadores seleccionados del rendimiento de nutrientes a nivel de producción y financiero para evaluaciones de palma de aceite y otros cultivos*. Fuente: Dobermann (2007); Fixen *et al.* (2015).

| Indicador NUE | Descripción | Interpretación |
|--|---|--|
| Productividad de factor parcial $PPF = Y/F$ | Rendimiento por unidad de nutriente aplicada. | El PPF proporciona información sobre las tendencias de productividad a largo plazo de un sistema de cultivos, en comparación con los insumos de nutrientes que recibe. |
| Equilibrio parcial de nutrientes $PNB = Y*N/F$ | Proporción de la cantidad de nutrientes eliminados en los productos cosechados y la de nutrientes aplicados. | El PNB es un indicador a largo plazo de las tendencias de eliminación de nutrientes, y es más útil al combinarlo con información sobre la fertilidad del suelo. |
| Eficiencia agronómica $AE = (Y-Y_0)/F$ | Aumento en el rendimiento, en comparación con el <i>rendimiento sin fertilizante</i> y con el adicional por unidad de nutriente aplicada. | El AE es un indicador a corto plazo del impacto de los nutrientes aplicados sobre la productividad. |
| Relación de nutriente a precio de producto (NOP) $NOP = \$F/\Y | El costo del fertilizante en relación con el precio recibido por el producto. | Esta relación indica el aumento en el rendimiento que se requiere para suplir el costo del fertilizante utilizado. |
| Relación de costo y valor $VCR = (Y-Y_0)*\$Y/F*\F $o = AE/NOP$ | El aumento en los retornos con base en el costo del fertilizante. | Este es el beneficio marginal sobre la inversión financiera en el fertilizante. |

Continúa →

1 El rendimiento ‘tomado’ (Oberthür *et al.*, 2012a) es la porción realmente cosechada (o recuperada) del total de racimos de fruto del cultivo disponibles durante la cosecha. El cultivo total disponible es el rendimiento

biológico o “hecho”, producido por las palmas en el periodo anterior de desarrollo de racimos de dos años (Breure, 2003), utilizando los recursos naturales disponibles y los insumos administrados.

Continuación Tabla 1. Indicadores seleccionados del rendimiento de nutrientes a nivel de producción y financiero para evaluaciones de palma de aceite y otros cultivos*. Fuente: Dobermann (2007); Fixen *et al.* (2015).

| Indicador NUE | Descripción | Interpretación |
|---|---|--|
| Relación de valor parcial y costo $PVRC = \frac{Y * \$Y}{F * \$F}$ $o = PPF / VCR$ | El aumento relativo en el beneficio sobre el aumento relativo en el costo del fertilizante. | Donde los valores de AE son menos seguros, esta configuración que utiliza PPF da un beneficio parcial de presupuesto sobre la inversión en fertilizante. |

*(Y = rendimiento tomado; Y0 = rendimiento no fertilizado; F = nutriente aplicado en fertilizante; N = concentración de nutrientes en producto eliminado; \$Y = valor del rendimiento; \$ F = costo del fertilizante).

Nota: para calcular el uso anual de fertilizante, se utilizaron los del periodo de 30 a seis meses antes de la cosecha.

La aplicación de métricas de NPI a cultivos perennes en situaciones comerciales es menos común debido a los largos ciclos de producción, el uso de fertilizantes con varios nutrientes y la variación entre los tipos de suelo y los años. Weih (2014) y Srivastava & Malhotra (2017) presentaron descripciones generales para evaluar el NUE en estos cultivos, pero no hay mucho más sobre el tema en la literatura. Parte de este problema es que existen pocos datos sobre la respuesta marginal de cultivos perennes, como la palma de aceite, a respuestas de nutrientes individuales que sean relevantes para estimar la eficiencia agronómica (AE, Tabla 1). Este artículo discute cómo se pueden derivar las métricas en granjas o plantaciones comerciales, para luego utilizarlas para evaluar el rendimiento de los nutrientes y revisar los programas de fertilizantes a lo largo del tiempo.

Derivación de NPI para evaluar una plantación comercial

Los datos utilizados en este informe están basados en Plantation Intelligence (Cook *et al.*, 2014; Oberthür *et al.*, 2017) y se recogen del periodo 2011-2018 de una plantación comercial con tres fincas que cubren 17.755 ha en Borneo, Indonesia. Hay 442 bloques (ju-

nio 2018) en tres fincas, y pocos han sido excluidos debido a datos o metadatos incompletos. La media del tamaño de bloque es de 41 ha y la densidad promedio de plantación es de 131 palmas/ha. La producción está dividida en cinco grupos de manejo del suelo (SMG, por su sigla en inglés)², con base en un estudio de suelos no publicado (Param Agricultural Soil Surveys /M Sdn, Bhd, 2007) y las palmas aquí incluidas van de los seis a los 17 años de edad. Existe un número desigual de palmas de cada grupo de edad en cada tipo de suelo, pero el conjunto de datos más grande es para los bloques con palmas de 13 a 17 años de edad en el SMG C y D. Para cada uno se registran los rendimientos tomados de racimos de fruta fresca (RFF), así como el uso de nutrientes. La media de rendimiento tomado de RFF de la plantación fue de $24 \pm 4,6$ t RFF/ha y la del uso anual de nutrientes de 140 kg N/ha, 35 kg P/ha y 286 kg K/ha. Mg, B y otros adicionales fueron usados regularmente.

Debido al periodo de desarrollo de cada racimo de fruta, se utilizó el fertilizante de 30 a seis meses antes de la cosecha para calcular el uso anual de fertilizantes que contribuye al rendimiento anual. La aplicación de fertilizante ocurre entre una y tres veces al año en cada bloque y estos datos son emparejados con el rendimiento tomado anual con una

2 SMG A = ultisoles y oxisoles bien drenados y poco profundos a profundos, con alta fijación de P en terreno ondulado a continuo; SMG B = ultisoles bien drenados y profundos en terreno ondulado; SMG C = ultisoles profundos en terrenos planos a ondulados con nece-

sidades de drenaje; SMG D = espodosoles poco profundos a moderadamente profundos en terreno ondulado; SMG F = suelos orgánicos poco profundos a moderadamente profundos, con drenaje muy pobre y rastros de elementos de Cu, Zn y B.

aplicación de 12 meses de fertilizante, derivada de los periodos particulares para N, P o K que conducen hasta la cosecha. Las concentraciones de nutrientes empleadas (3,07 kg N/t RFF, 0,38 kg P/t RFF y 3,84 kg K/t RFF) fueron derivadas del resumen en Donough *et al.* (2016). Estos valores se aplicaron a todos los SMG, años y edades de las palmas. Los detalles completos de estos métodos pueden encontrarse en otros autores.

La derivación de la productividad de factor parcial (PPF) y el equilibrio parcial de nutrientes (PNB), se calcula con facilidad con los datos de la plantación. Considerando las diferentes proporciones de nutrientes entre los bloques comerciales, es mejor calcularlos para cada nutriente de interés en vez de para la aplicación total de fertilizantes. Sin embargo, derivar la eficiencia agronómica (AE) es más complejo, puesto que requiere un tratamiento de fertilizante nulo para derivar el rendimiento sin fertilizantes (Y0), y en las fincas comerciales es poco probable que existan estos bloques o áreas dentro de los bloques.

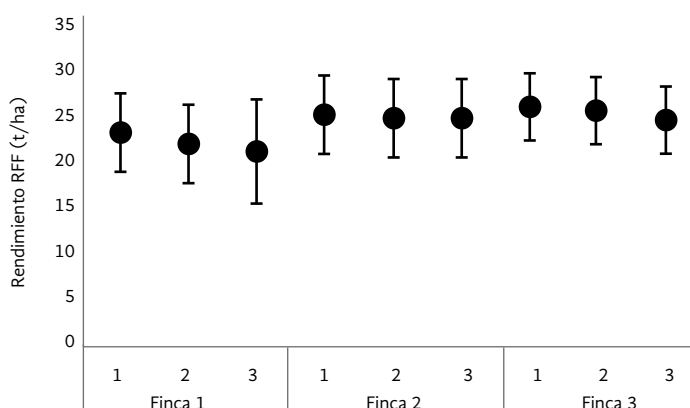
Existen varios enfoques para derivar un Y0, el cual, para una evaluación realista, sería el efecto de retener el uso de fertilizante por tres o más años (el periodo de desarrollo de rendimiento). Los valores pueden ser diferentes dependiendo de la edad de la palma, las condiciones estacionales, los nutrientes y el SMG. En la ausencia de valores experimentales en campo o del concepto de un experto es necesario estimar Y0. Esto se puede realizar seleccionando los valores de una literatura limitada o utilizando un enfoque estadístico desde el interior del conjunto de datos, tales como la regresión, el ajuste de valores límite o con la densi-

dad de probabilidad de los datos. En este conjunto de datos de investigación se calculó Y0 para cada grupo de SMG y de edad de la palma empleando un valor con una desviación estándar menor que la media de ese grupo. Debido a la existencia de años con rendimientos mayores y menores, la diferencia entre estos fue ajustada hacia arriba o hacia abajo entre + 9 % y -11 % con base en la media de rendimiento para ese grupo de edad y tipo de suelo en relación con otros años. Este valor se utiliza con fines ilustrativos y se requieren trabajos adicionales para desarrollar valores de Y0 más resistentes y confiables para derivar la AE.

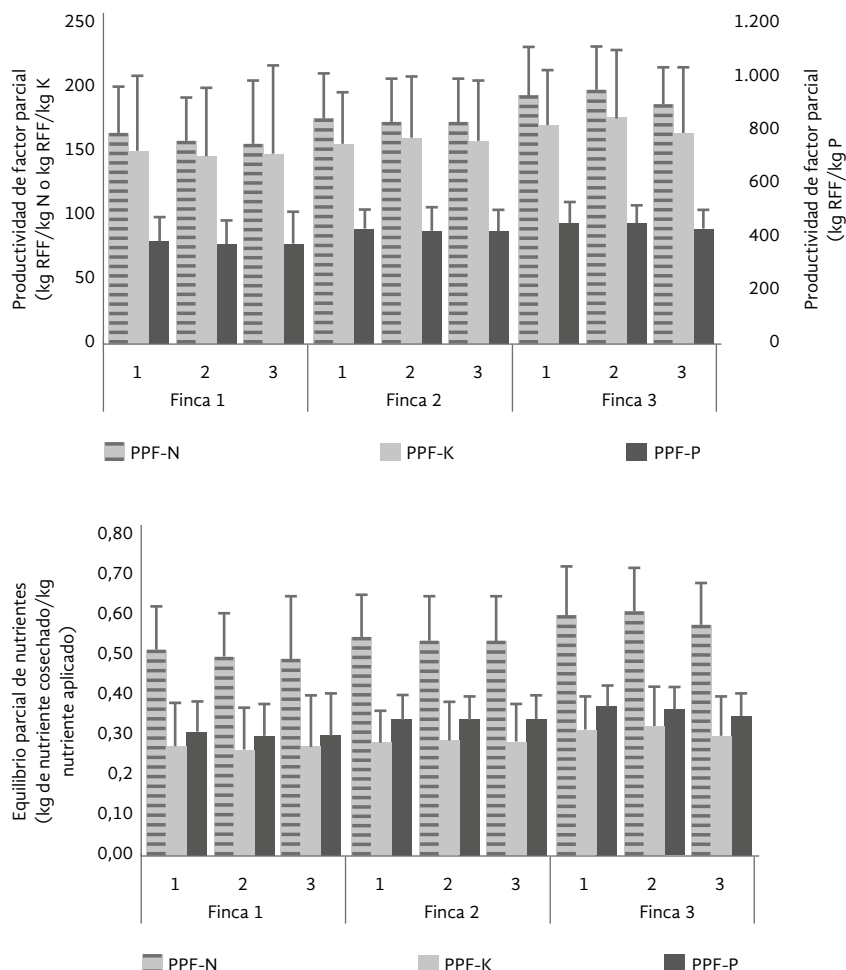
Ejemplos de NPI de datos de una plantación comercial

Cualquier conjunto de valores se puede comparar utilizando datos comerciales. Por ejemplo, se cotejan las fincas con plantaciones o las divisiones al interior de las fincas, pero estas comparaciones suelen tener factores de confusión incrustados en los datos usados. Aun así, pueden ser de interés para los administradores de las fincas. La Figura 1 muestra los valores comparativos de PNB y PPF para N, P y K en tres plantaciones dentro de los datos de prueba. Los coeficientes de variación de estos datos suelen estar en el rango de 20-30 % y son sujeto de la aplicación de análisis estadísticos tradicionales (por ejemplo, el de varianza) para su comparación y evaluación. De hecho, se puede realizar cualquier comparación de interés, como con la edad de la palma, con los tipos de suelo o entre el tiempo, o incluso entre plantaciones, divisiones y subdivisiones. Nuestro análisis (no mostrado) indica que la edad de la palma y el SMG tienen una inte-

Figura 1. Indicadores de rendimiento de nutrientes en tres fincas de una plantación de palma de aceite en Borneo: a) rendimiento de racimos de fruta fresca (RFF); b) productividad de factor parcial de nitrógeno (PPF-N), fósforo (PPF-P) y potasio (PPF-K); y c) equilibrio parcial de nutrientes para nitrógeno (PNB-N), fósforo (PNB-P) y potasio (PNB-K).



Continúa →



Continuación Figura 1. Indicadores de rendimiento de nutrientes en tres fincas de una plantación de palma de aceite en Borneo: a) rendimiento de racimos de fruta fresca (RFF); b) productividad de factor parcial de nitrógeno (PPF-N), fósforo (PPF-P) y potasio (PPF-K); y c) equilibrio parcial de nutrientes para nitrógeno (PNB-N), fósforo (PNB-P) y potasio (PNB-K).

Nota: La media de PPF-N fue 174 ± 39 kg RFF/kg N, la de PPF-P fue 750 ± 258 kg RFF/kg P y la de PPF-K 85 ± 19 kg RFF/kg K. La media de PNB-N fue $0,53 \pm 0,12$, la de PNB-P $0,29 \pm 0,10$ y la de PNB-K $0,33 \pm 0,07$. Las desviaciones estándar para cada valor muestran la variación al interior de cada conjunto de datos.

racción significativa ($p < 0,05$) para el rendimiento de RFF, de manera que los patrones de desarrollo de rendimiento eran diferentes respecto a los SMG con-

siderados. La Figura 2 presenta una comparación del rendimiento de RFF para la edad de la palma y SMG a partir del conjunto de datos de la plantación.

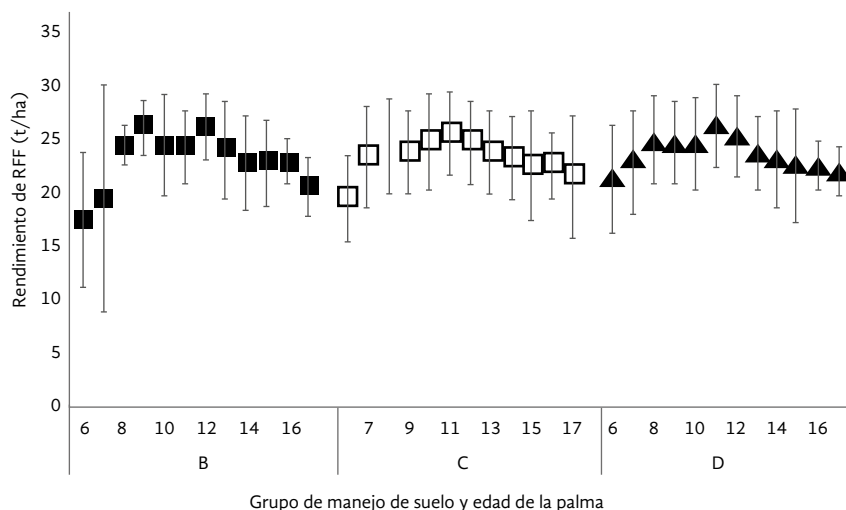


Figura 2. Rendimiento promedio de racimos de fruta fresca (t/ha) para diferentes edades de palma en tres grupos de manejo de suelos para una plantación en Borneo.

Nota: se muestran las desviaciones estándar de cada valor para indicar la variación al interior de cada conjunto de datos.

Debido a la interacción, es probable que cualquiera de estas comparaciones de factores únicos para evaluar los NPI confunda la edad de la palma, las condiciones estacionarias y el tipo de suelo, todas las que afectan el rendimiento de los RFF, y por lo tanto el NPI derivado. Estos factores de confusión deben ser tenidos en cuenta al evaluar el desempeño de bloques individuales para ayudar a guiar el manejo futuro y obtener la mayor claridad posible sobre los efectos del manejo de nutrientes.

Con base en este conjunto de datos, e ignorando el agrupamiento de diferentes cohortes de tipo de suelo, año y edad de la palma, la Tabla 2 presenta los valores evaluados para rendimiento, PPF, PNB y AE. Los valores para cada nutriente son más relevantes si dicho nutriente es el que más limita la producción, porque si, por ejemplo, el N es limitante, los valores de PPF no se verán afectados por otros nutrientes. Estos NPI representan un conjunto de puntos de referencia sobre los que se puede evaluar el rendimiento de nutrientes en otros lugares o de grupos al

interior de este conjunto de datos. Por supuesto, se tiene precaución con estos valores, ya que son preliminares y están abiertos a amplias conjeturas en el presente. También se muestran los valores de NPI para cereales, según lo informado por Fixen *et al.* (2015). Si bien son diferentes entre estos dos tipos de cultivos, no debe concluirse que uno de estos es más o menos eficiente para utilizar nutrientes que el otro. Una parte de esta diferencia se debe a que distintos productos tienen diversas densidades de energía y, en consecuencia, diferentes costos fotosintéticos (Penning de Vries *et al.*, 1974).

Presentación e interpretación de NPI

La naturaleza y método de exposición de NPI se determinan dependiendo del tipo de comparaciones que los administradores quieran obtener de los datos. La Figura 3 muestra un ejemplo de presentación potencial, en el que se indica la media y desviaciones estándar para el rendimiento de RFF (Figura 3a), PPF-N

Tabla 2. Indicadores de rendimiento de nutrientes derivados de una plantación en Borneo.

| NPI | Rango de valores para palma de aceite | Valores de cereales |
|---|---------------------------------------|---------------------|
| Rendimiento t (RFF/ha) | 24,0 ± 4,6 | - |
| PPF-N (kg RFF/kg N) | 174 ± 39 | 40-90 |
| PPF-P (kg RFF/kg P) | 750 ± 258 | 100-250 |
| PPF-K (kg RFF/kg K) | 85 ± 19 | 75-300 |
| PNB-N (N eliminado/N aplicado) | 0,53 ± 0,12 | 0,7-0,9 |
| PNB-P (P eliminado/P aplicado) | 0,28 ± 0,10 | 0,7-0,9 |
| PNB-K (K eliminado/K aplicado) | 0,33 ± 0,07 | 0,7-0,9 |
| AE-N (aumento en RFF/N aplicado) | 30 ± 30 | 15-30 |
| AE- P (aumento en RFF/ P aplicado) | 128 ± 131 | 15-40 |
| AE- K (aumento en RFF/ K aplicado) | 15 ± 15 | 8-20 |
| VCR-NPK (\$ recuperado/\$ fertilizante) | 8,6 ± 2,5 | - |

Nota: se muestra el valor medio para cada indicador junto con la desviación estándar de esa media. Un valor “normal” de este conjunto de datos estaría dentro del rango de una desviación estándar por encima y una por debajo de la media. Por interés, los valores de estos NPI para cereales también se muestran en Fixen *et al.* (2015).

(Figura 3b), PNB-N (Figura 3c) y AE-N (Figura 3d) a lo largo de cuatro años, para todas las palmas de 10 años de edad en la plantación sembrada en el SMG C en 2014 y seguimiento a esa cohorte hasta 2017. Los símbolos superpuestos sobre las cajas de los cuatro NPI representan dos bloques tomados como ejemplos de palmas de 10 años de edad en 2014, creciendo en el SMG C, y permite una comparación de estos bloques con similares y en el tiempo.

Durante los cuatro años, el rendimiento medio de bloque para el A con el menor rendimiento (círculos grises) fue de 21,80 t RFF/ha con una tasa media de N aplicado de 123 kg N/ha; mientras que el bloque B con mejor desempeño (triángulos abiertos) tuvo un rendimiento promedio de 27,16 t RFF/ha y una tasa media de N aplicado de 147 kg N/ha. En términos de PPF-N y PNB-N para estos dos bloques, solo en 2014 hubo una clara diferencia en los indicadores, pero el B mostró un AE-N mayor que el A consistentemente. Puede ser que las condiciones del suelo, tales como el drenaje o el pH en el A fuera menos favorable que en el B. En este caso, la comparación en términos equi-

parables, representa una manera de evaluar el rendimiento de nutrientes para bloques. Si bien el cotejo de bloques a lo largo de los años es útil para evaluar cohortes particulares de palmas, también se pueden hacer otras comparaciones entre grupos, como por ejemplo entre SMG o entre regiones al interior de plantaciones. Igualmente es posible desarrollar patrones espaciales en los NPI.

La interpretación de los NPI requiere una apreciación de la naturaleza de este indicador particular. El rendimiento del racimo de fruta fresca es más fácil, ya que, por lo general, entre mayor sea el rendimiento mejor es el desempeño del bloque; aunque es necesario incluir algunas consideraciones económicas, según se describe en la siguiente sección “Monetizar los NPI”. La Figura 4 muestra una curva típica de la respuesta del rendimiento al añadir fertilizantes/nutrientes. El rendimiento aumenta al inicio, principalmente en respuesta al nutriente añadido (A-B), pero la cantidad de rendimiento extra se reduce a medida que se agregan más cantidades (B-C, luego C-D): la ley de los rendimientos decrecientes. Cualquier nu-

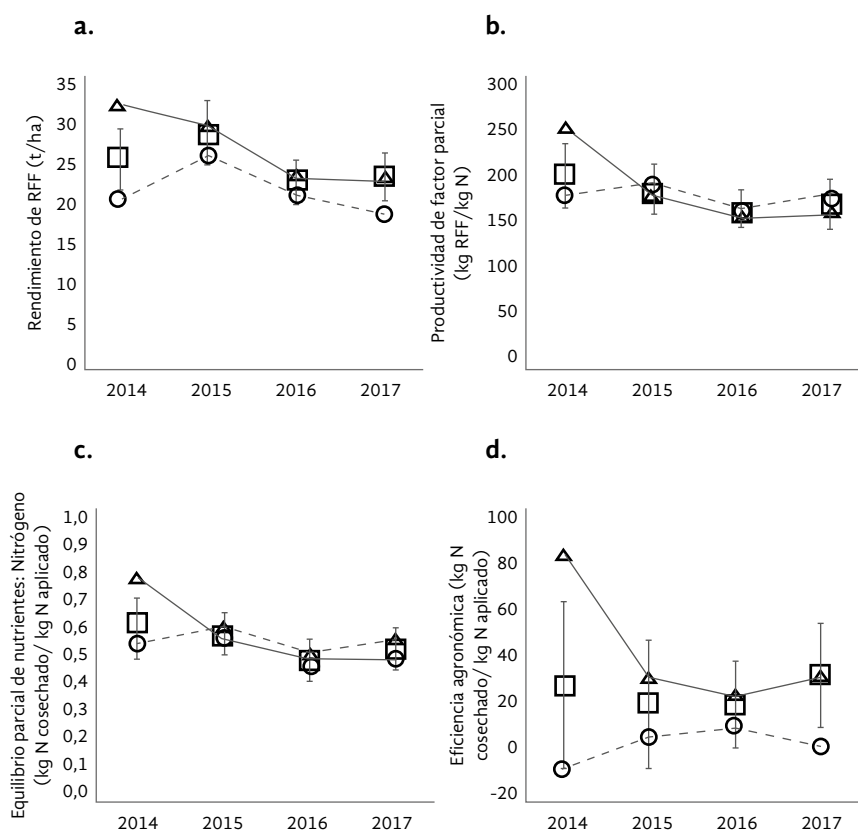


Figura 3. Rendimiento comparativo de una cohorte de palmas de 10 años de edad en 2014 que fue monitoreada durante 2015, 2016 y 2017 en una plantación comercial en Borneo.

Nota: datos para a) rendimiento de racimos de fruta fresca (RFF t/ha); b) productividad de factor parcial de nitrógeno (PPF-N, kg RFF/kg N); c) equilibrio parcial de nutrientes de nitrógeno (PNB-N, kg N/kg N); y d) eficiencia agronómica de N (aumento en kg de RFF/kg N). Se muestran los indicadores de rendimiento de nutrientes para dos bloques: A (círculo gris) y B (triángulos abiertos) tomados aleatoriamente de la cohorte. Las tasas de nitrógeno que llevan a los rendimientos para los cuatro años de los círculos grises son 118 kg N/ha, 134 kg N/ha, 132 kg N/ha y 107 kg N/ha, y para los triángulos abiertos 127 kg N/ha, 165 kg N/ha, 150 kg N/ha y 145 kg N/ha.

triente añadido por encima del rendimiento máximo (E) no resulta en uno adicional y en poca captación, y por lo tanto, no proporciona retornos económicos inmediatos y puede resultar en su acumulación en el suelo o en un mayor riesgo de pérdida para el ambiente. La pendiente de A hacia B depende de la fertilidad de fondo del suelo. El rendimiento tiende a aumentar considerablemente con el primer incremento de fertilizante añadido y, luego, la respuesta relativa se reduce con cada cantidad sucesiva de fertilizante adicionada en una función típica de “rendimientos decrecientes”. En la planicie de rendimiento (> E) algunos factores como agua, la interceptación de radiación solar, u otros factores diferentes al nutriente suministrado, lo limitan.

Dado que la magnitud absoluta de la respuesta en el rendimiento se reduce con nutrientes adicionales, tanto PPF como PNB y AE (no mostrado) también disminuyen. Los mayores valores de PPF y PNB son a la menor cantidad de fertilizante, no porque esta sea la más eficiente, sino porque la respuesta relativa es la más alta a dicha cantidad. Si se selecciona únicamente con base en PPF o AE, entonces los mayores valores ocurrirían a cantidades de fertilizante muy bajas, lo que también resultaría en el menor rendimiento. La consecuencia es que la producción se reduciría sustancialmente y cualquier nutriente eliminado vendría de las reservas en el suelo, de manera que PNB sería alto (> 1) y esencialmente insostenible, debido a que se eliminarían más nutrientes del suelo de los que se suministran a través del fertilizante. En esencia, esto

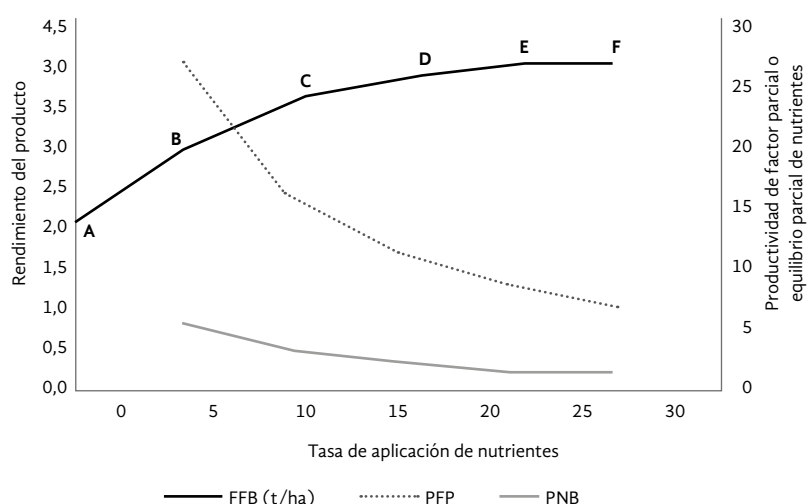
es empobrecimiento del suelo. Entonces, si bien la eficiencia más alta en el rendimiento ocurre cuando los rendimientos son menores, no se debe sacrificar la efectividad por la eficiencia.

El equilibrio parcial de nutrientes también tiene un rango de dimensiones que debe ser considerado. De la Tabla 2, podría deducirse (erróneamente) que solo el 28 % del P aplicado (o el 535 del N o el 33 % del K) se “pierde” en el ambiente, pero el PNB solo consideró la eliminación en el producto. Si bien un PNB > 1 implica un “empobrecimiento” de los nutrientes del suelo, donde las reservas son altas, esto podría ser una manera razonable de explotarlas. Cuando el PNB < 1 se añaden más nutrientes de los que se eliminan, pero el destino de dichos nutrientes no se puede describir con una relación tan simple.

Para la palma de aceite y otros cultivos, los nutrientes también se invierten en elementos estructurales como las frondas, troncos y raíces. Si bien algunos pueden reciclarse mediante el amontonamiento de frondas, los nutrientes del tronco solo se reciclan al final del ciclo de plantación si la biomasa es triturada y devuelta al suelo. Por ejemplo, se reportó que los nutrientes inmovilizados en los troncos de palma eran de 0,22 kg N/palma/y, 0,016 kg P/palma/y 0,47 kg K/palma/y (Lim *et al.*, 2018), de manera que, por ejemplo, a 131 palmas/h, se pueden inmovilizar 28,8 kg N/ha anualmente en los tejidos del tronco, sin reciclarlos hasta la resiembra. A medida que la plantación envejece, la cantidad de nutrientes presentes en este material aumenta, de manera que el cálculo

Figura 4. Ejemplo de rendimiento de cultivo e indicadores de rendimiento de equilibrio parcial de nutrientes (kg nutriente eliminado/ kg nutriente aplicado) y productividad de factor parcial (t rendimiento/kg nutriente aplicado) en respuesta a los nutrientes aplicados.

Nota: con base en una concentración de 4 kg por tonelada de producto.



del PNB a lo largo del tiempo debe incluir una consideración de las cantidades almacenadas. También puede ser una estrategia razonable, utilizar la aplicación de nutrientes por encima de la eliminación del producto para construir reservas de nutrientes en el suelo, y esto puede ser particularmente importante en los tropicales muy agotados. Los ensayos en el suelo, junto con los estimados de PNB, proporcionan más confianza al evaluar el destino de los nutrientes en las plantaciones de palma de aceite.

La Tabla 3 presenta un resumen conceptual de cómo se puede considerar e interpretar el PPF y el rendimiento en un conjunto de posibles decisiones de manejo. Tales resultados deben ser discutidos con los administradores de las fincas y validados experimentalmente antes de desarrollar recomendaciones firmes. Relacionar el PNB con los valores de ensayos del suelo también ayuda a guiar las decisiones de manejo de nutrientes.

Monetizar los NPI

Si bien el uso de fertilizante suele ser visto como una decisión agronómica, para la mayoría de los administradores de plantaciones la cantidad de fertilizante a utilizar es, fundamentalmente, una decisión económica estrechamente relacionada con el precio relativo pagado por el nutriente y el valor recibido por los productos. Esta métrica, llamada nutriente a precio de producto (NOP, Tabla 1), cambia año tras año a medida que los precios de las materias primas y los

ingresos por el producto varían, así como las proporciones relativas de los nutrientes suministrados. En el conjunto de datos considerado a lo largo del tiempo, con base en los precios de materias primas de Index Mundi (ver <https://www.indexmundi.com/commodities/>) para fertilizante y aceite de palma, entre 2014 y 2017 el NOP se encontraba dentro del rango de $6,32 \pm 1,12$. De esta manera, durante este periodo se requerían 6,3 kg RFF para pagar 1 kg de fertilizante mixto. Así, si el NOP es muy bajo, las cantidades utilizadas serían más altas que si el costo fuera mayor. Alternativamente, si el valor del producto es muy bajo o el costo del fertilizante es muy alto, habría pocos incentivos para utilizar nutrientes, ya que se obtendrían escasos beneficios, incluso con una inversión pequeña. Sin embargo, si el valor del producto es alto, ya sea en términos comerciales o en seguridad alimentaria, se añadiría más fertilizante para llevar el potencial de rendimiento al máximo. Hasta qué punto se llega, depende de la actitud frente al riesgo y los recursos financieros del productor. La teoría económica tradicional indica que, por lo general, la rentabilidad máxima es de 90-95 % del rendimiento máximo.

Los beneficios por bloque o unidad de manejo también se pueden indexar utilizando la relación de costo y valor (VCR, Tabla 1), ya sea usando AE o PPF, dividido por el NOP de cada nutriente. Derivar el VCR para cada nutriente es difícil debido a la manera en la que se deriva AE, alternativamente se puede considerar utilizar un valor de fertilizante completo (N + P + K) y el PPF para el fertilizante total.

Tabla 3. Interpretación conceptual de la relación entre el rendimiento de la palma de aceite y la eficiencia agronómica o la productividad de factor parcial. Los valores altos y bajos pueden ser considerados como relativos a los valores promedio (medios) del conjunto de datos.

| | | Rendimiento de RFF | |
|---|-------------------------|--|---|
| | | Por debajo del promedio | Por encima del promedio |
| Eficiencia agronómica o productividad de factor parcial | Por debajo del promedio | Investigar el suelo u otras limitantes (pH, anegamiento, etc.) | Reducir el uso de fertilizante, ya que aquí el beneficio es relativamente pobre. |
| | Por encima del promedio | Lo mejor es invertir más en fertilizante. | Es probable que sea bueno invertir más en fertilizante, pero hay que asegurarse que el PNB no indique el empobrecimiento de los nutrientes. |

La Figura 5 muestra que el VCR del fertilizante total para los cinco SMG considerados en este conjunto de datos de la plantación, es bastante variable para cada SMG pero que, por lo general, es similar entre grupos de suelos. Esto sugiere que el manejo, y no el grupo de suelos, es importante para lograr altos beneficios sobre la inversión. Nuevamente, se debe tener precaución al considerar la Figura 5, ya que el VCR se confunde con el año y la edad de la palma, de manera que hacer observaciones detalladas sobre la desagregación de estos efectos está por fuera del alcance de este artículo general. Aun así, el beneficio aparente de la inversión en fertilizantes a lo largo de la plantación fue de 8,6, lo cual corresponde a un retorno promedio sobre una inversión en fertilizante de USD 2.780/ha. Este es parcial porque el único costo considerado es el del fertilizante, no otros operativos fijos o variables al interior de la plantación.

Limitaciones y oportunidades

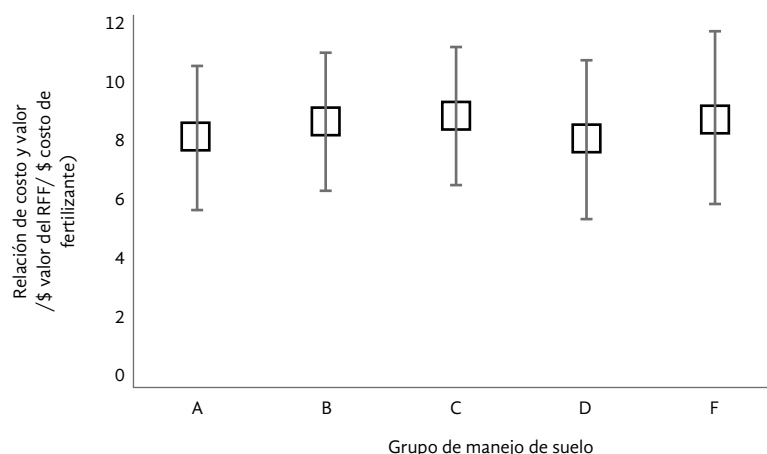
Si bien el desarrollo de puntos de referencia es valioso para hacer comparaciones al interior de las plantaciones y entre grupos de productores de palma de aceite, existen limitaciones importantes en la interpretación de los datos. En primer lugar, el manejo en una plantación comercial reducirá la variación de fondo con grupos de bloques, de manera que las diferencias pueden ser menores de lo que serían sin intervenciones. Una parte significativa de esta limitación es que nunca es probable que haya un bloque con cero nutrientes, pero quizás desarrollar áreas al

interior de bloques que tengan fertilizantes retenidos para ciertos periodos, puede ayudar a calificar la respuesta actual a los nutrientes añadidos, necesaria para evaluar la AE de mejor manera. Adicionalmente, el fertilizante suele ser multinutriente y hay pocos, si es que los hay, de único nutriente mediante experimentos de exclusión de cantidad disponibles para la palma de aceite. La situación es similar para estimar la eficiencia de nutrientes en cultivos perennes, según lo descrito por Srivastava & Malhotra (2017), en su caso, principalmente con frutos cítricos.

También es necesaria una mejor cuantificación de las eliminaciones reales de nutrientes en RFF, así como considerar el papel del rendimiento no tomado sobre los equilibrios de nutrientes y la productividad al interior de bloques particulares. Se ha identificado que un intervalo de cosecha más corto tiene una correlación positiva con el rendimiento (Oberthür *et al.*, 2012b), que a su vez afecta todos los valores de NPI, que están basados en el rendimiento tomado. En los estimados de PNB también es importante considerar otros sumideros y fuentes de nutrientes, como las cantidades y tiempos del ciclo de nutrientes en varios grupos de biomasa de la palma como la fronda, racimos vacíos y troncos, así como los cambios en las reservas del suelo. Si bien los valores de PNB pueden parecer bajos en comparación con los cultivos anuales, es necesario considerar estos grupos en un ciclo de cultivo perenne a largo plazo.

Para los cálculos, se debe tener cuidado con la configuración de los insumos de uso de fertilizante.

Figura 5. Relación de costo y valor (VCR) para palmas cultivadas en diferentes grupos de manejo de suelos a lo largo de cuatro años, en una plantación en Borneo. El VCR se calculó como el PPF/NOP y no como el AE/NOP.



En el ejemplo, el uso de nutrientes fue anualizado para el periodo de seis a 30 meses antes de la cosecha, tomando los insumos y productos mensualmente. Considerando que N, P y K tienen diferentes respuestas de cultivos residuales y tiempos de residencia en suelos, también puede ser necesario ajustar la duración entre la aplicación y el rendimiento para tener en cuenta estos factores.

La oportunidad es desarrollar NPI en grandes conjuntos de datos para brindar retroalimentación a los administradores sobre el desempeño de los nutrientes, así como ayudar a una comunidad más amplia a

entender la naturaleza multidimensional de estas evaluaciones. La Figura 6 muestra algunos ejemplos de cómo se pueden presentar dichas evaluaciones, comparando dos fincas al interior de la plantación en un periodo de siete años y con varios NPI. Esto ocurre en una etapa temprana del proceso, pero la automatización del almacenamiento, recuperación y presentación de los datos a través de una base de acceso o una aplicación web, puede considerarse como el producto final del mismo. Los datos se podrían extraer de plantaciones, regiones e incluso países, para construir una evaluación más sustantiva de la efectividad y la eficiencia del uso de nutrientes en la palma de aceite.

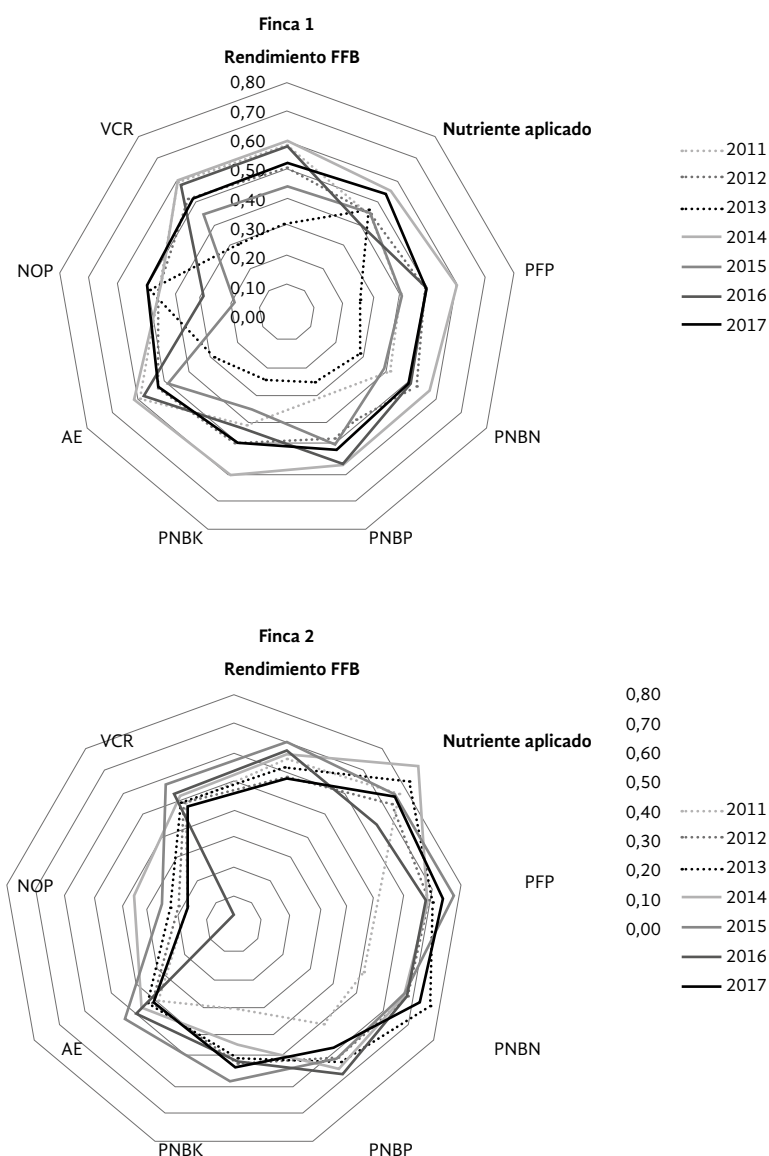


Figura 6. Ejemplos de indicadores de ejes múltiples para comparar las diferentes dimensiones del rendimiento de nutrientes a lo largo del tiempo para dos fincas en una plantación en Borneo.

Referencias bibliográficas

- Breure, K. (2003). The search for yield in oil palm: Basic principles. In: Fairhurst, T., & Hardter, R. (Eds.). *Oil palm: Management for large and sustainable yields*. Singapore: PPI/PPIC.
- Cook, S., Lim, C. H., Mohanraj, S. N., Samosir, Y. M. S., Donough, C. R., Oberthür, T., ... & Kam, S.P. (2014). Palm oil at the crossroads: The role of Plantation Intelligence to support change, profit and sustainability. *The Planter*, 90(1061), 563-575.
- Davidson, L. (1993). Management for efficient, cost-effective and productive oil palm plantations. In: *Proc. 1991 PORIM International Palm Oil Conference, Agriculture* (Basiron et al., Eds). Palm Oil Research Institute of Malaysia, Kuala Lumpur.
- Dobermann, A. (2007). Nutrient use efficiency – measurement and management. In: *IFA International Workshop on Fertilizer Best Management Practices*. Brussels, Belgium.
- Donough, C. R., Cayho, A., Ruli, W., Fisher, M., & Oberthür, T. (2016). Plant nutrients in palm oil. *Better Crops*, 100(2), 19-22.
- Fixen, P., Brentrup, F., Bruulsema, T., García, F., Norton, R., & Zingore, S. (2015). Nutrient/fertilizer use efficiency: measurement, current situation and trends. In: Drechsel, P., Heffer, P., Magen, H., Mikkelsen, R., & Wichelns, D. (Eds.). *Managing Water and Fertilizer for Sustainable Agricultural Intensification*. Paris, France: International Fertilizer Industry Association (IFA), International Water Management Institute (IWMI), International Plant Nutrition Institute (IPNI), and International Potash Institute (IPI).
- Kee, K. K., & Goh, K. J. (2006). Efficient fertilizer management for higher productivity and sustainability in oil palm production. In: *Higher Productivity and Efficient Practices for Sustainable Plantation Agriculture* (Vol.1). Kuala Lumpur: Incorporated Society of Planters.
- Lim, Y. L., Wandri, R., Gerendas, J., Sugianto, H., Donough, C., & Oberthür, T. (2018). *An update on oil palm nutrient budgets*. Poster presented at International Oil Palm Conference, The Santika Premiere Dyandra Hotel & Convention, Medan, Indonesia.
- Mutert, E. (2001). Nutrient management for oil palm. In: *Strategic Directions for the Sustainability of the Oil Palm Industry* (Pushparajah, E., Ed.). Kuala Lumpur: Incorporated Society of Planters.
- Ng, S. K., & Thamboo, S. (1967). Nutrient contents of oil palm in Malaya. I. Nutrients required for reproduction: Fruit bunches and male inflorescences. *The Malaysian Agricultural Journal*, 46, 3-45.
- Ng, S. K., Thamboo, S., & De-Souza, P. (1968). Nutrient contents of oil palm in Malaya. II. Nutrients in vegetative tissues. *The Malaysian Agricultural Journal*, 46, 332-391.
- Norton, R., Davidson, E., & Roberts, T. (2015). *Nitrogen use efficiency and nutrient performance indicators. Task Team report and recommendations. Zero Order Draft for the Global Partnership on Nutrient Management*. New York: United Nations Environmental Program.
- Oberthür, T., Cock, J., Donough, C. R., Rahmadsyah, Abdurrohman, G., Indrasuara, K., Lubis, A., & Dolong, T. (2012a). Best management practices (BMP) in oil palm fertilization for sustainable intensification. *Palmas*, 34(especial Tomo I), 174-202.
- Oberthür, T., Donough, C. R., Indrasuara, K., Dolong, T., & Abdurrohman, G. (2012b). Successful intensification of oil palm plantations with best management practices: Impacts of fresh fruit bunch and oil yield. *Proceedings of the International Planters Conference*. Kuala Lumpur.
- Oberthür, T., Donough, C. R., Cook, S., Sugianto, H., Lim, Y. L., Cook, S., Kam, S. P., & Fisher, M. J. (2017). Plantation Intelligence applied oil palm operations: Unlocking value by analysing commercial data. *The Planter*, 93(1094), 339-351.

- Penning de Vries, F. W. T., Brunsting, A. H. M., & Van Laar, L. H. H. (1974). Products, requirements and efficiency of biosynthesis: a quantitative approach. *Journal of Theoretical Biology*, 45, 339-377.
- Srivastava, A. K., & Malhotra, S. K. (2017). Nutrient use efficiency in perennial fruit crops. A review. *Journal of Plant Nutrition*, 40(13), 1928-1953.
- Veloo, R., Paimin, S., & Shaharuddin, M. R. (2013). Rising cost of plantation business. *The Planter*, 89(1050), 661-672.
- Weih, M. (2014). A calculation tool for analyzing Nitrogen use efficiency in annual and perennial crops. *Agronomy*, 4, 470-477.

Biodisponibilidad de boro derivado de tres fuentes de boro en dos tipos de suelo*

Boron Bioavailability Derived from Three Sources in Two Soil Types of Boron



MARCEL BARBIER

Especialista en Desarrollo,
Development Specialist, Rio Tinto,
U.S.A.

CITACIÓN: Barbier, M. (2019). Biodisponibilidad de boro derivado de tres fuentes de boro en dos tipos de suelo. *Palmas*, 40 (Especial, tomo I), 158-167.

PALABRAS CLAVE: boro, biodisponibilidad, nutrición vegetal.

KEYWORDS: Boron, bioavailability, plant nutrition.

*Artículo original recibido en español.

Nota: este estudio fue realizado por U.S. Borax y Fundación ABC.

Resumen

El boro (B) es un elemento esencial para las plantas ya que participa en muchos procesos fisiológicos. Sus efectos sobre la productividad de las mismas depende de la cantidad de B biodisponible en la solución del suelo. Así mismo, la solubilidad de la fuente de B está directamente relacionada con su biodisponibilidad para las plantas. Para determinarla, después de la aplicación de diferentes fuentes, se estableció un experimento en columnas de suelo, donde se evaluaron dos tipos de suelo con diferentes texturas y contenido de B: Arenoso (299 g kg^{-1} de arcilla y $0,2 \text{ mg dm}^{-3}$ de B) y arcilloso (727 g kg^{-1} de arcilla y $0,4 \text{ mg dm}^{-3}$ de B). Las fuentes de B fueron tratamientos con dos fuentes de baja solubilidad (ulexita en polvo y en grano) y tres fuentes de alta solubilidad (ácido bórico y tetraborato de sodio grano fino [Fertibor] y grano grueso [Granubor]). El diseño experimental fue de bloque completamente al azar con cuatro repeticiones. Cada unidad experimental tenía $0,0157 \text{ m}^3$ de suelo contenido en un tubo de PVC (0,7 m altura por 0,1 m diámetro). El suelo en las columnas fue saturado a 60 % de agua en el espacio poroso y después las fuentes de B se aplicaron sobre la superficie del suelo. Seguido, se

inició el suministro semanal de agua desionizada a través de un sistema de goteo, con dosis de 0,5 ml y 0,8 ml en los suelos arenoso y arcilloso, respectivamente. Al final de cada semana, estudio que se hizo en un periodo de 40 semanas, fue analizado el contenido de B en la solución percolada. Este análisis mostró una mayor biodisponibilidad de B proveniente de los tratamientos de las fuentes de alta solubilidad, con más de 90 % del B liberado durante las primeras 10 semanas del estudio en ambos suelos. Después de 30 semanas, el B liberado alcanzó más de 95 % del total del B que fue aplicado a las columnas. En promedio, se estimó que durante las primeras 10 semanas, una cantidad de 9,3 mm de agua es liberada por cada punto porcentual de B. Por el contrario, las fuentes de B menos solubles para ambos suelos, mostrando un máximo de 47 % de B total liberado después de 40 semanas. Al término del experimento, se analizó el contenido de B en el suelo. En el arenoso, se encontró que era más alto en los tratamientos de las fuentes de menor solubilidad, mientras que en el arcilloso, todos los tratamientos mostraron un mayor contenido de B en el control que no lo recibió, sin hallar diferencias entre las fuentes de B. Las fuentes de alta solubilidad de B liberaron casi el 100 %, en tanto que las menos solubles liberaron menos de 50 % de B. El boro restante en el suelo tratado con fuentes menos solubles no liberaron el B a través de una gran cantidad de agua percolada (promedio de 3.300 mm). Los aspectos importantes a tener en cuenta son: poder mejorar la biodisponibilidad de B, la fuente correcta de B y el momento exacto de aplicación.

Abstract

Boron (B) is an essential element for plants and is involved in many physiological processes. B effect on plant productivity relies on its bioavailability in the soil solution. The solubility of the B source is directly associated with B bioavailability in plants. In order to determine B bio-availability after the application of various sources, an experiment was set up in soil columns, where two types of soil with different textures and B content were evaluated: Sandy soil (299 g kg^{-1} of clay and 0.2 mg dm^{-3} of B) and clay soil (727 g kg^{-1} of clay and 0.4 mg dm^{-3} of B). B sources were treatments with two low-solubility sources (powder and granulated ulexite) and three high-solubility sources (boric acid and fine-grained [Fertibor], and coarse-grained [Granubor]) sodium tetraborate. The experimental design was a completely randomized block with four repetitions. Each experimental unit had 0.0157 m^3 of soil contained in a PVC pipe (0.7 m high by 0.1 m in diameter). The porous space of the soil in the columns was saturated with 60% water, and B sources were subsequently applied on the soil surface. The weekly supply of deionized water started later, using a drip system. Dosage rates were 0.5 ml and 0.8 ml in sandy and clay soils, respectively. The B content of the percolated solution was analyzed at the end of each week. This study was conducted in a 40-week time period. The analysis of percolated solutions showed a higher B bioavailability as a result of treatments with high-solubility sources, with over 90% of B released within the first 10 weeks in both soils. After 30 weeks, the B released was over 95% of the total B applied in the columns. In average, it was estimated that during the first 10 weeks, an amount of 9.3 mm of water per each percentage point of B is released. On the contrary, in average, less soluble B sources in both soil types showed 47% of total B released after 40 weeks. At the conclusion of the experiment, the B content of the soil was analyzed. Sandy soil was found to have a higher B content in the treatments of the less soluble sources, while in clay soil all treatments showed higher B content in the control that did not receive B. However, no differences were found between B sources. Highly soluble B sources released almost 100% of B, while less soluble sources released less than 50% of B.

Introducción

U.S. Borax, parte del Grupo Rio Tinto, es una empresa líder a nivel global en el suministro y desarrollo de boratos refinados, abasteciendo el 30 % de la demanda mundial de este tipo de productos. Desde sus instalaciones de alta tecnología ubicadas en California, U.S. Borax atiende a más de 500 clientes con más de 1.700 centros de distribución a nivel global. Para la agricultura provee los boratos refinados con mayor pureza en el mercado global. Por su parte, la Fundación ABC es una institución de carácter particular sin ánimo de lucro, que realiza investigación aplicada para desarrollar y adaptar nuevas tecnologías, con el objetivo de promover soluciones tecnológicas para el agronegocio en los estados de Sao Paulo y Paraná en Brasil.






Desde la época de Babilonia, hace más de 6.000 años, se conocían los compuestos de boro, los cuales también eran conocidos en Egipto, China, Tíbet y Arabia. Las palabras Buraq del árabe y Burah del persa dan origen a la palabra bórax. El boro elemental fue reportado por primera vez a inicios del siglo XIX (1807), cuando Davy, Gay-Lussac y Thénard prepararon boro por la reducción de trióxido de boro con potasio y por electrólisis de ácido bórico humedecido. Con estos métodos se consiguieron productos con una pureza de 50 %. Alrededor de 1850 se obtuvieron productos de boro impuros similares al diamante y al

grafito, tales como el borato de aluminio (AlB₁₂) y un complejo de boro, aluminio y carbón. Años después, se logró un boro con un mayor grado de pureza (hasta casi 90 %) a través de la reducción del trióxido bórico con magnesio. Este producto era castaño claro y considerado amorfo. La extracción de minerales con contenido de boro se inició en 1872 en el Valle de la Muerte, California. Su extracción a escala industrial inició a partir de 1927, cuando se empezó la excavación de la primera mina abierta en la costa oeste de los Estados Unidos.

La necesidad del boro (B) como un nutriente para las plantas fue demostrada por primera vez por la botánica Katherine Warington (1923). Desde entonces, se han reportado diversos estudios respecto a la necesidad del B como nutriente en diversos tipos de plantas. Los primeros síntomas de deficiencia de boro en palma de aceite fueron descritos por Kovachich en el Congo, entre 1952 y 1953.

Existen varios minerales que contienen boro partiendo desde las rocas ígneas y metamórficas hasta las sedimentarias, y que son usados en la fabricación de fertilizantes. Los minerales que tienen boro y oxígeno se llaman boratos. Existen diferentes tipos pero los utilizados en la industria de fabricación de fertilizantes son borato de sodio, borato de sodio y calcio, borato de calcio y borato de calcio y magnesio. La principal diferencia entre ellos no es el contenido de

Figura 1. Minerales que contienen boro y son usados para fabricar fertilizantes.

| Borato de sodio | | Borato de sodio y calcio | Borato de calcio | Borato de calcio y magnesio |
|--|---|---|--|--|
|  |  |  |  |  |
| Tincal o Bórax $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ Soluble en agua (2,65 g/100ml) $35 \% \text{B}_2\text{O}_3 \rightarrow 11 \% \text{B}$ | Kernita $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ Parcialmente soluble en agua (1,90 g/100ml) $48 \% \text{B}_2\text{O}_3 \rightarrow 15 \% \text{B}$ | Ulexita $\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ Ligeramente soluble en agua (1,09 g/100ml) $32 \text{ a } 42 \% \text{B}_2\text{O}_3 \rightarrow 8-15 \% \text{B}$ | Colemanita $\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ Insoluble en agua (0,47 g/100ml) $40 \text{ a } 48 \% \text{B}_2\text{O}_3 \rightarrow 15 \% \text{B}$ | Hidroboracita $\text{CaMgB}_6\text{O}_{11} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ Insoluble en agua (0,08 g/100ml) $48 \% \text{B}_2\text{O}_3 \rightarrow 15 \% \text{B}$ |

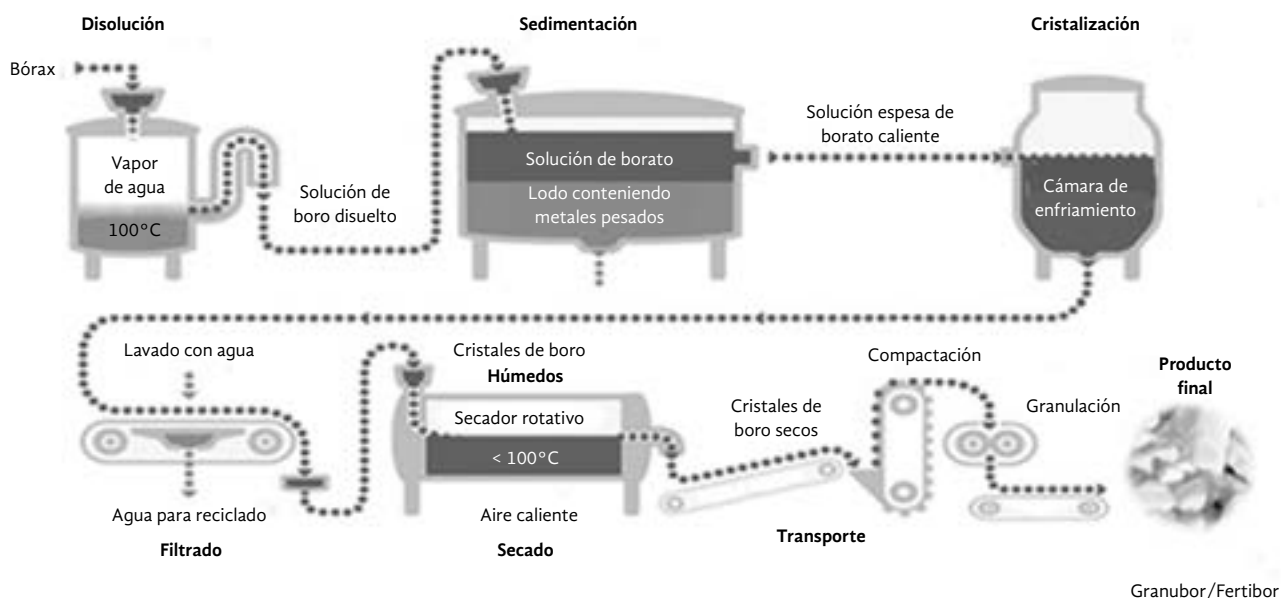
diversos elementos, sino la solubilidad en agua. Los boratos de sodio lo son pero de estos el bórax o tincal es el más soluble (2,65 g/100ml de agua), seguido de la kernita (1,90 g/100ml de agua), la ulexita (1,09 g/100ml de agua), la colemanita (0,47 g/100 ml de agua) y finalmente la hidroboracita (0,08 mg/100ml de agua) como se muestra en la Figura 1.

El tipo de roca generalmente no controla la solubilidad del boro en la solución del suelo. Esta lo hace por las reacciones de adsorción como el pH de la solución, el contenido de materia orgánica, los tipos de arcilla y la humedad y temperatura del suelo. Dichas reacciones son las que determinan que cantidad de B soluble en agua estará disponible para la absorción por las plantas. Los minerales son extraídos de las minas junto con suelo y otros materiales no deseados. Luego, se separan por tamaño y se benefician para poder ser comercializados. En el caso de los minerales como la ulexita y la colemanita e hidroboracita que son poco solubles, no son refinados. Un borato, es una molécula que contiene boro y oxígeno. Un borato refinado, además de haber sido sometido a un

proceso de refinamiento, pasa por un proceso en el que se remueven las impurezas como metales pesados y otros elementos.

El proceso de refinamiento de los boratos más solubles como el bórax o tincal y kernita (Figura 2) inicia a través de la disolución del mineral molido usando vapor de agua caliente, el cual no alcanza una temperatura mayor a 100 °C. En seguida se forma una solución de boro disuelto que pasa luego a un tanque de sedimentación, donde se remueve el lodo que contiene metales pesados. Posteriormente, del tanque de sedimentación sale una solución espesa de borato caliente que es transportada a una cámara de enfriamiento. En esta cámara se forman cristales de boro que luego son llevados para ser lavados con agua a temperatura ambiente y pasar por un proceso de filtrado para terminar de remover coloides menores. En el último paso de refinamiento, los cristales de boro húmedo llegan a un secador rotativo con aire caliente a una temperatura menor de 100 °C. Finalmente, estos son transportados a una compactadora y granuladora, donde se forman los granos del tetraborato de sodio.

Figura 2. Proceso de beneficio y refinamiento del borato de sodio.



A diferencia, el proceso de beneficiado de los minerales menos solubles como la ulexita es muy simple. El mineral molido se lava con agua y luego la solución va a un sistema de filtrado para remover coloides. El mineral molido y lavado pasa por un secador rotativo donde el material es calcinado a una temperatura entre 625 y 830 °C. Finalmente, este material es enviado a granulación y empaque para su venta (Figura 3).

Las fábricas que producen boratos para el mercado usan una mezcla de ácido nítrico más ácido clorhídrico, como medio de solución para extraer el contenido total de boro en un material. Luego, reportan en las etiquetas de los fertilizantes el contenido de boro total, más no el de boro soluble en agua. Cuando la extracción se hace con agua caliente, se extrae el contenido máximo de boro que un mineral puede ofrecer. Mediante la extracción con agua caliente se muestra que solo el borato de sodio refinado ofrece cerca del 100 % de boro que puede estar disponible en la solución del suelo, mientras las fuentes de borato de sodio y calcio tienen menos del 50 %.

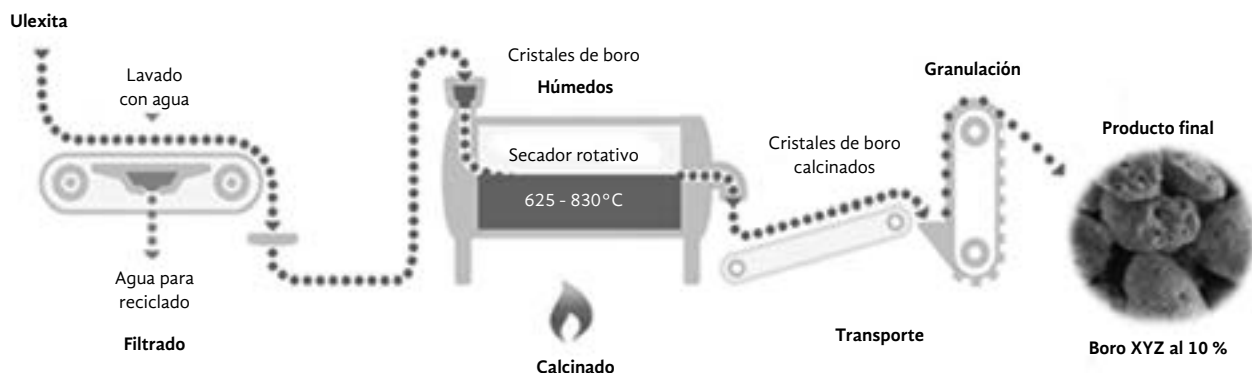
Las plantas solo absorben el boro en forma de ácido bórico, principalmente a través de las raíces. Posteriormente, el ácido bórico es transportado vía xilema hacia todos los meristemos que se encuentran en continuo crecimiento. El boro entra con varios otros nutrientes que son absorbidos por el flujo de masa, principalmente nitrógeno y azufre. Estos viajan por el xilema junto con el agua hacia las zonas de mayor demanda de cada nutriente, hasta que las fracciones no usadas son evapotranspiradas por los estomas de las hojas.

Materiales y métodos

En este estudio se buscó analizar el comportamiento de liberación de boro a través de dos diferentes tipos de suelo a través de un diseño experimental al azar. Cada unidad estuvo compuesta por un tubo de PVC de 0,1m (4 pulgadas) de diámetro y 0,7m (27¼ pulgadas) de altura, con un volumen equivalente a 0,0157 m³ igual a 15,7 litros. Se utilizaron dos suelos con diferentes tipos de textura: uno de arena amarilla conteniendo 62,4 % de arena, 7,7 % de limo y 29,9 % de arcilla, y otro de arcilla roja con 14,1 % de arena, 13,2 % de limo y 72,7 % de arcilla. El suelo arenoso tenía 24 g dm⁻³ de materia orgánica, un pH de 4,7 y una capacidad de intercambio catiónico de 71,7 mmolc dm⁻³. El suelo arcilloso registró parámetros de 49 g dm⁻³ de materia orgánica, un pH de 4,1 y una capacidad de intercambio catiónico de 169,6 mmolc dm⁻³.

Las fuentes de boro usadas fueron: ácido bórico, tetraborato de sodio y pentaborato de sodio, las cuales fueron sometidas a un proceso de evaluación para determinar el porcentaje de ácido bórico en ácido cítrico al 2 % y el porcentaje de boro en agua tibia. El porcentaje de boro soluble en ácido cítrico al 2 % fue de 18,49 % para el ácido bórico; 16,14 % para el tetraborato de sodio; y 10,97 % para el pentaborato de sodio y calcio. Por su parte, el porcentaje de boro en agua tibia para el ácido bórico fue de 18,64 %, 13,80 % para el tetraborato de sodio y 5,41 % para el pentaborato de sodio y calcio.

Figura 3. Proceso de beneficio de borato de sodio y calcio.



Se llevaron a cabo doce tratamientos en total, seis para cada tipo de suelo, a los cuales se suministró una dosis proporcional a 2 kg de boro por hectárea, con excepción del primero. El segundo recibió tetraborato de sodio en forma de grano grueso (2,8 mm); el tercero, pentaborato de sodio y calcio en forma de grano grueso en polvo (2 mm) proveniente de Argentina y granulado proveniente de Brasil; el cuarto, pentaborato de sodio y calcio en forma de grano grueso (2 mm) de origen Bolivia; el quinto, ácido bórico en polvo; y el sexto, tetraborato de sodio en forma de gránulos finos.

A cada columna se le añadieron cinco cm de arena lavada y desinfectada en un autoclave. Se colocaron 50 cm de suelo y luego se saturaron con 1.000 ml de agua desionizada. Posteriormente se adicionaron las fuentes de boro y se cubrieron con otros cinco cm de arena lavada y desinfectada. Por un periodo de 40 semanas, en forma consecutiva, cada semana se adicionaron 500 ml de agua desionizada a cada columna con el suelo arenoso y 800 ml a las de suelo arcilloso. Así mismo, cada semana se colectaron las soluciones percoladas, las cuales fueron analizadas para determinar el contenido de boro en la solución.

Con base en los análisis realizados, se determinó el porcentaje de boro liberado y biodisponible en la solución. A la media de los resultados obtenidos de cada tratamiento se restó los datos obtenidos del

control que no recibieron boro. Esta diferencia se dividió dentro del porcentaje total de boro adicionado al inicio del estudio. El porcentaje acumulado de cada semana fue calculado y según los resultados obtenidos se diagramaron las curvas de liberación.

Resultados

La Figura 4 muestra las curvas de liberación en el suelo arenoso con pH 4,7, simulando una precipitación acumulada de 2.546 mm en 40 semanas, muestran que el ácido bórico llegó a liberar el total del boro adicionado en la semana 12 del estudio, el tetraborato de sodio de gránulos finos en la semana 19, el tetraborato de sodio de granos gruesos en 40 semanas y en el caso del pentaborato de sodio, solo se logró recuperar el 47 y el 41 % del boro adicionado inicialmente para las fuentes de Argentina y Bolivia, respectivamente.

La Figura 5 muestra las curvas de liberación en el suelo arcilloso con pH 4,1, simulando una precipitación acumulada de 4.074 mm en 40 semanas. Esta figura permite evidenciar que ácido bórico llegó a liberar el total del boro adicionado en la semana 20, el tetraborato de sodio de gránulos finos en la semana 26, el tetraborato de sodio de granos gruesos en 39 semanas. En el caso del pentaborato de sodio, solo se logró recuperar el 35 % del boro adicionado inicialmente para ambas fuentes.

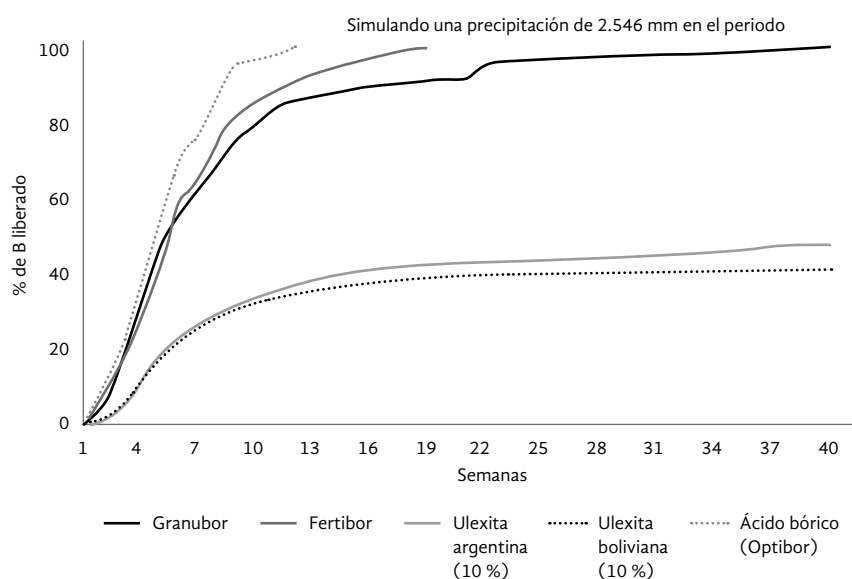
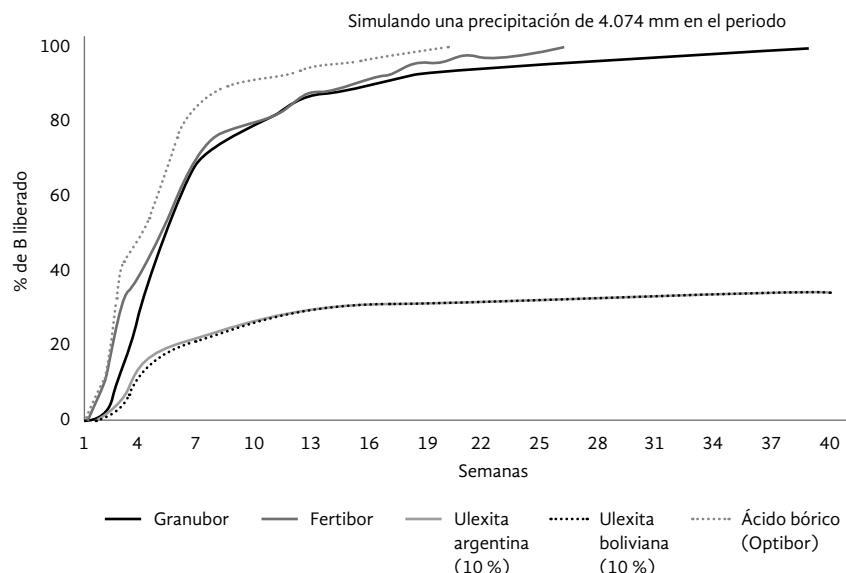


Figura 4. Curvas de liberación de B en suelo arenoso con pH 4,7.

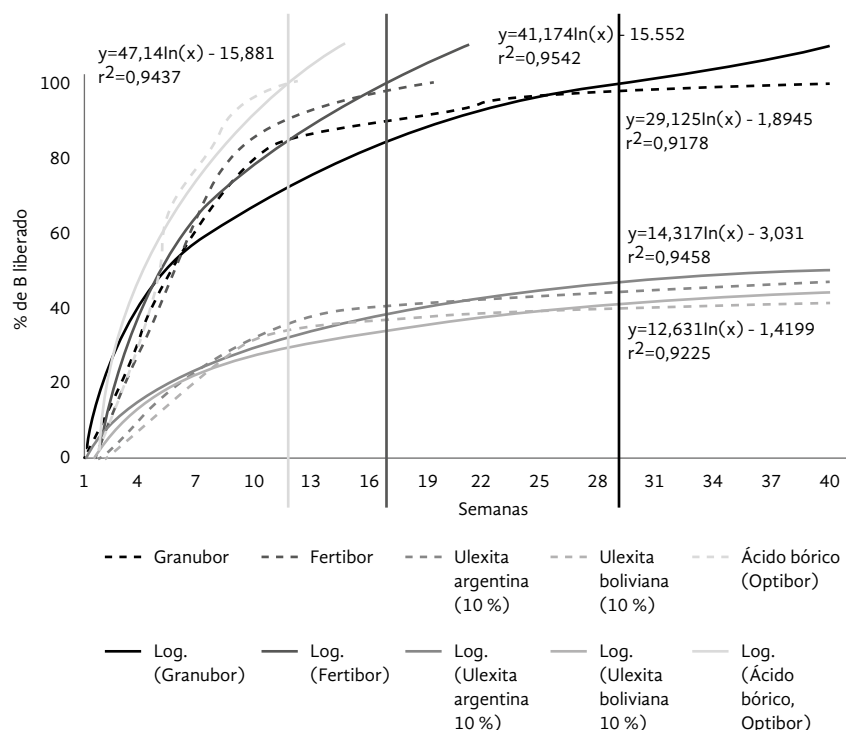
Figura 5. Curvas de liberación de B en suelo arcilloso con pH 4,1.



Utilizando la herramienta de diseño de tendencias incluida en el *software* Microsoft PowerPoint, se calcularon las curvas de regresión de tendencia logarítmica que son las que mejor se ajustaron a la distribución de los valores obtenidos. Posteriormente, se cruzaron líneas verticales para determinar el momento en el que se podría esperar que

bajo una situación similar se pudiese liberar el 100 % del boro adicionado inicialmente. La diagramación solo fue posible para las fuentes del ácido bórico y el tetraborato de sodio, ya que las de pentaborato de sodio y calcio no llegaron a liberar el contenido total de boro en el término de tiempo del estudio (Figura 6).

Figura 6. Tendencia logarítmica de liberación de B en suelo arenoso, pH 4,7.



De igual forma, se diagramaron las curvas de tendencia de regresión lineal para las fuentes evaluadas en el suelo arcilloso, lo cual solo fue posible para las fuentes del ácido bórico y el tetraborato de sodio, puesto que las fuentes de pentaborato de sodio y calcio tampoco llegaron a liberar el contenido total de boro en el término de tiempo del estudio (Figura 7).

A diferencia del ácido bórico, el tetraborato de sodio tiene dos moléculas de sodio que sustentan la disociación gradual de este compuesto. Inicialmente, cada molécula de tetraborato de sodio se disuelve en la solución del suelo en tres moléculas de ácido bórico, hidróxido de sodio y agua, para posteriormente disolverse en otra molécula llamada tetrahidroxiborato de sodio, que enseguida se disuelve en la solución del suelo en otra molécula de ácido bórico, hidróxido de sodio y más agua. Las cuatro moléculas de boro contenidas en el tetraborato de sodio son liberadas en la solución del suelo como ácido bórico y estará biodisponible para la absorción de las plantas junto con el agua.

De igual forma, a diferencia del tetraborato de sodio, el pentaborato de sodio tiene una molécula más de boro pero una menos de sodio y una de calcio en su lugar. Este compuesto inicialmente logra liberar dos

moléculas de ácido bórico en la solución del suelo, hidróxido de sodio y agua. No obstante, la mayor parte de esta molécula contiene calcio, lo cual hace que las tres moléculas de boro permanezcan fuertemente ligadas a la misma y no puedan ser liberadas en la solución del suelo para estar disponibles para las plantas.

Al final del estudio se analizó el contenido de boro que quedó en el suelo en cada uno de los tratamientos evaluados. El testigo en el suelo arenoso que no recibió boro fue el que menos contenido presentó, disminuyendo en 54 mg dm^{-3} . Este fue seguido por el ácido bórico que incrementó la concentración de boro en el suelo en 40 mg dm^{-3} , al igual que el tetraborato de sodio que en promedio aumentó en 48 mg dm^{-3} y, finalmente, por el pentaborato de sodio que lo hizo en 168 mg dm^{-3} . A diferencia del análisis del suelo arenoso, en el caso del suelo arcilloso el contenido de boro en el testigo que no recibió boro no presentó diferencia con respecto al análisis hecho al inicio del estudio. La fuente de ácido bórico incrementó el contenido de boro en el suelo en 95 mg dm^{-3} con respecto al muestreo inicial, seguido del tetraborato de sodio, que aumentó en 107 mg dm^{-3} , y por el pentaborato de sodio, que aumentó en 180 mg dm^{-3} .

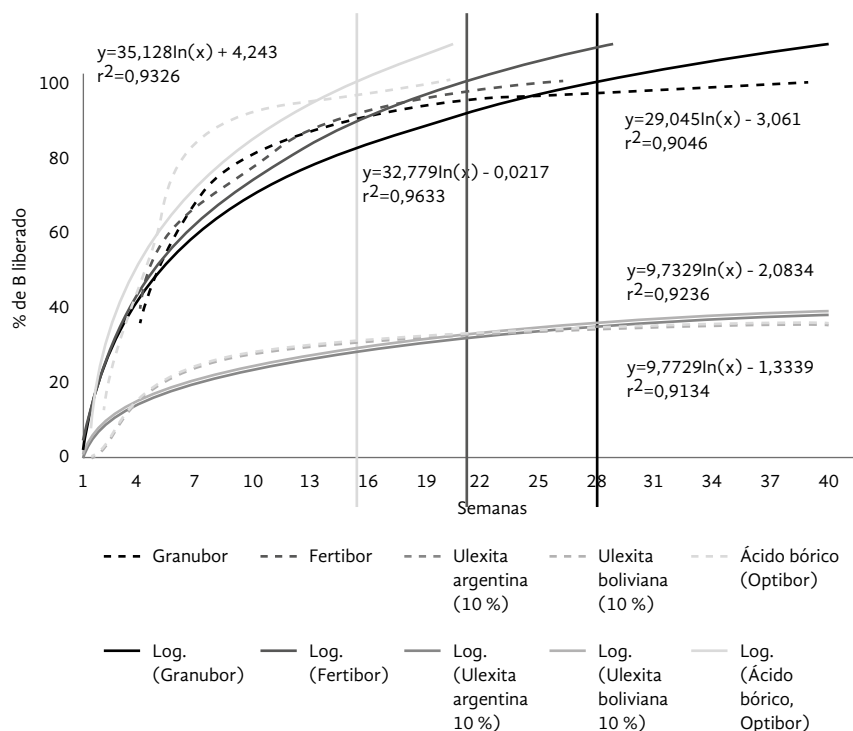


Figura 7. Tendencia logarítmica de liberación de B en suelo arcilloso, pH 4,1.

Suena bien pensar cuánto puede incrementarse el contenido de boro en el suelo al aplicar una determinada fuente. Sin embargo, lo importante es entender cuándo es que el boro proveniente de una determinada fuente podrá estar disponible para la absorción por las plantas. Retomando el cálculo de la fórmula de la tendencia de regresión logarítmica, se debería esperar que, independiente del suelo, a partir del ácido bórico se pueda obtener el boro liberado en su totalidad en el transcurso de 12 a 15 semanas; en el caso del tetraborato de sodio en gránulos finos de 17 a 21 semanas y en el del tetraborato de sodio de grano grueso alrededor de 29 semanas. En cuanto al pentaborato de sodio y calcio se tendría que esperar un periodo extremadamente largo (entre 25 hasta 466 años) para obtener la disponibilidad total del boro dejado en el suelo (Tabla 1)

Conclusiones

El ácido bórico y el tetraborato de sodio liberan mayor cantidad de boro biodisponible que el pentaborato de sodio y calcio. El contenido de boro en el ácido bórico se liberó en su totalidad en 12 semanas de transcurrido el estudio en el suelo arenoso y en 15 semanas en el arcilloso. En el tetraborato de sodio de gránulo fino se liberó en su totalidad en 19 semanas

en el suelo arenoso y en 26 semanas en el arcilloso. En el tetraborato de sodio de grano grueso se liberó en su totalidad en 40 semanas en el suelo arenoso y en 39 semanas en el arcilloso. Por el contrario, el pentaborato de sodio y calcio, en promedio, mostraron un máximo de 47 % de boro total liberado después de 40 semanas para ambos suelos. El contenido de boro en el suelo de los tratamientos de fuentes menos solubles no liberaron el boro a través de una gran cantidad de agua percolada (promedio de 3.300 mm), y se concluye que el mismo se liberará en un tiempo demasiado prolongado debido a la forma molecular en que esta fuente pueda estar en el suelo.

Recomendaciones

Para poder mejorar la biodisponibilidad de boro es importante tener en cuenta la fuente correcta y el momento adecuado de aplicación. El tetraborato de sodio de grano grueso presenta una liberación más gradual sobre el tetraborato de sodio de grano fino. Contar con estudios a un plazo mayor en el cultivo de palma de aceite donde se incluyan otras variables como la absorción por los principales tejidos de la palma (hojas y raíces) y ganancia de biomasa, es un asunto que se encuentra ya en proceso.

Tabla 1. Relación del tiempo necesario para obtener la biodisponibilidad total de B en distintas fuentes.

| Suelo | Fuente | Marca Comercial | R ² | Fórmula de la tendencia logarítmica | Tiempo calculado para liberar el 100 % de B | |
|-----------|--------------------------------------|-------------------|----------------|-------------------------------------|---|-----------|
| | | | | | x = Semanas | AAA MM DD |
| Arenoso | Ácido bórico (polvo) | Ácido bórico | 0,9437 | $y=47,14\ln(x) - 15.881$ | 12 | 02 23 |
| Arcilloso | Ácido bórico (polvo) | Ácido bórico | 0,9326 | $y=35,128\ln(x) + 4.243$ | 15 | 03 14 |
| Arenoso | Borato de sodio (grano fino) | Fertibor | 0,9178 | $y=41,174\ln(x) - 15.552$ | 17 | 03 28 |
| Arcilloso | Borato de sodio (grano fino) | Fertibor | 0,9633 | $y=32,779\ln(x) + 0,0217$ | 21 | 04 25 |
| Arenoso | Borato de sodio (granulado) | Granubor | 0,9437 | $y=29,125\ln(x) + 1.8945$ | 29 | 06 21 |
| Arcilloso | Borato de sodio (granulado) | Granubor | 0,9046 | $y=29,045\ln(x) + 3.061$ | 29 | 06 21 |
| Arenoso | Borato de sodio y calcio (granulado) | Ulexita Argentina | 0,9458 | $y=14,317\ln(x) - 3,031$ | 1,335 | 25 08 07 |
| Arenoso | Borato de sodio y calcio (granulado) | Ulexita Bolivia | 0,9225 | $y=12.631\ln(x) - 1.4199$ | 3,070 | 59 00 14 |
| Arcilloso | Borato de sodio y calcio (granulado) | Ulexita Argentina | 0,9236 | $y=9,7329\ln(x) + 2,0834$ | 23,405 | 450 00 13 |
| Arcilloso | Borato de sodio y calcio (granulado) | Ulexita Bolivia | 0,9134 | $y=9,7729\ln(x) - 1,3339$ | 24,250 | 466 01 15 |

Referencias

U.S. Borax, Inc. (2012). El boro en suelos y nutrición de plantas. Una guía práctica a la fertilización con boro. Chicago: U.S. Borax, Inc.

Warrington, K. (1923). The effect of boric acid and borax on the broad bean and certain other plants. *Ann. Bot.*, 37, 629-671.

Woods, W. G. (1994). An Introduction to boron: history, sources, uses and chemistry. *Environmental Health Perspectives*, 102, 5-11.

Aplicación del principio de centro de gravedad (centro geométrico-centroide) para la optimización de recorridos e inicio de operaciones en clúster de aplicación de fertilizante*

Application of the Center of Gravity Principle (Geometric Center-Centroid) to Optimize Travel and Starting Times Using Fertilizer Application Clusters



SERGIO D. CASTRO G.

Líder Departamento Técnico y
Desarrollo, Verion Colombia
Leader Technical and Development
Department

AUTORES: Castro, S. D. & Socha, A. H.

CITACIÓN: Castro, S. D., & Socha, A. H. (2019). Aplicación del principio de centro de gravedad (centro geométrico-centroide) para la optimización de recorridos e inicio de operaciones en clúster de aplicación de fertilizante. *Palmas*, 40 (Especial, tomo I), 168-176.

PALABRAS CLAVE: optimización, planeación, agricultura de precisión, GPS, SIG, análisis de datos.

KEYWORDS: Optimization, planning, precision agriculture, GPS, GIS, data analysis.

*Artículo original recibido en español.

Resumen

El desarrollo de la sostenibilidad empieza con hacer cada vez más eficientes y rentables nuestros procesos productivos, buscando la reducción del impacto ambiental que generan las operaciones de maquinaria agrícola en el cultivo de palma de aceite. A lo largo de los años, en Colombia la planeación de las faenas agrícolas se realizó con base en experiencias previas e intuición de recorridos en función de cumplir con la tarea asignada. En la producción moderna agrícola hace falta una planeación estratégica basada en datos reales que permita explotar el potencial de los equipos disponibles, minimizando el costo de operación y optimizando el tiempo de recorrido. Con el sistema de monitoreo Verion (Vcom5.6) Gps novatel 10hz instalado en un tractor Massey Fergusson 292 Advance 105hp, se adquirieron los datos de recorrido de la labor de fertilización durante dos años equivalentes a las

últimas 12 campañas realizadas en una finca palmera ubicada en el departamento de Casanare, con una extensión total de 1.164 hectáreas. Verificando los recorridos por campaña se encontró que en los registros verificados se tiene como velocidad promedio 5,8 km/h con una tasa de avance promedio diaria de 54,2 ha. Resumiendo las fechas de trabajo en los lotes, se encuentra que con un promedio de trabajo de 10,4 horas se logra la aplicación total en 22 días, de los cuales 15 % del tiempo se ejecutó en traslados, lo que en el total de las aplicaciones anuales representa 15 días de trabajo.

Abstract

Sustainability is based on more efficient and profitable productive processes that pursue the reduction of the environmental impact caused by the use of agricultural machinery in oil palm plantations. Traditionally, agricultural activities in Colombia have been planned on the basis of prior experiences and intuition in order to accomplish the assigned tasks. Modern production requires strategic planning based on actual data that facilitate the use of equipment to its fullest potential, thus minimizing operation costs and optimizing travel times. Data on travel times required for fertilization campaigns were obtained using a Verion monitoring system (Vcom5.6) Novatel GPS, 10 Hz, mounted on a Massey Fergusson 292 Advanced tractor, 105 hp, during the past 2 years. This period covered the last 12 fertilization campaigns conducted in a 1,164 ha oil palm plantation located in Yopal, Casanare (Colombia). Once travel times were verified, we found that recorded average speed was 5.8 km/h at an average daily movement rate of 54.2 ha. By summarizing fertilization dates on the plots, we found that during 10.4 hours of work the total application was carried out in 22 days, with 15 % of the time spent in travel time. This represents 15 working days for total yearly application.

Introducción

Con el desarrollo de la actividad productiva, la necesidad de ser cada día más eficientes en todos los procesos y operaciones agrícolas ha ganado gran importancia. Una de las tareas primordiales que enfrentamos continuamente es la planeación y ejecución de labores mecanizadas en campo. El desarrollo, mantenimiento y cuidado de nuestro cultivo se convierte en un desafío permanente. La fertilización es fundamental para tener un cultivo de palma de aceite de alto rendimiento, convirtiéndose en una constante durante toda la vida del mismo. Dicha labor se ha realizado manualmente; sin embargo, la mecanización de esta y otras actividades se ha convertido en tendencia en los últimos años, ganando espacio a nivel nacional. Con sistemas de automatización y geoposicionamiento integrados en máquinas precisas, se ha logrado recolectar valiosa información de campo que permite comenzar a identificar tiempos, movimientos y relaciones de gestión de maquinaria que antes no eran visibles por

la dificultad de realizar mediciones confiables y continuas con respecto a las tareas ejecutadas en campo.

Con los datos recolectados podemos entrar en la fase de procesamiento de la información y análisis, tal como mencionan Peart (2004) y Bochtis, Sørensen & Busato (2014). Es así como se plantea el uso del concepto de centro geométrico (centroide) para la determinación de puntos estratégicos de inicio de labor y optimización de recorridos en la tarea específica de fertilización.

Adquisición de datos

El sistema de adquisición de datos está integrado por el sistema de control VERION, que consta de tres componentes básicos entre los que se cuenta VE-FIPS (fuente de poder), Vcom 5.6 (computadora para el registro de datos) y GPS Novatel (antena GPS 10 HZ- L1) (georreferencia). El funcionamiento consta de alimentación a 12 voltios instalada sobre un tractor Massey Ferguson 292 Advance, a partir del cual se toma la energía para distribuirla hacia el Vcom 5.6 y

la antena GPS Novatel, que generalmente tienen una tasa de transferencia de datos de 57.600 baudios. Este flujo de datos lo recibe el Vcom, en el que previamente se crea un archivo de almacenamiento y una matriz de datos, a los que asigna las coordenadas obtenidas por el GPS y los estados en los que se encuentra el sistema de control. Dichos estados pueden ser: trabajo, traslado, parado y una señal de alarma especial para condiciones anómalas del sistema.

El sistema de adquisición funciona básicamente como un flujo continuo de información con comunicación constante que registra: posición, estado, velocidad, tiempo, altura, HDOP¹, dosis teórica² y dosis real³ de los actuadores que tenga instalado.

Metodología

Centros de gravedad: determinación de zona

En la ingeniería existen diferentes tipos de centroides como por ejemplo centro de masa, centro de presión y centro de gravedad. Aunque todos constan de coordenadas que ubican un punto, representan conceptos diferentes debido a la variable que simbolizan, donde su posición coordenada puede variar dependiendo de la distribución del atributo de estudio. Por ejemplo, cuando estudiamos el centro de presión de una figura que tiene asociado un sistema de fuerzas que actúan sobre él, este centro estará ubicado en la resultante de dicho sistema, modulado por la distribución que tenga el sistema de fuerzas dentro de la figura.

Cuando abordamos el problema de distribución espacial en perímetros y parcelas palmeras, se debe trabajar desde una superficie plana donde su atributo de densidad puede ser función de atributos de altura o estado del lote, en razón a la variabilidad espacial registrada por los datos (Esposito *et al.*, 2012). Así, delimitar zonas basados en atributos topográficos

y/o propiedades físicas del suelo captura la variabilidad del rendimiento debido a las diferencias de agua disponible para la planta y, por lo tanto, el potencial de producción de cultivos.

Para el cálculo del centroide existen diferentes métodos pero usaremos el de integración para ampliar el concepto, y como herramienta de cálculo el sistema de información geográfica que permite encontrar las coordenadas de cada punto de manera práctica, empleando así la fórmula de integral coordenada (Ec 1):

$$\bar{x} = \frac{1}{A} \int_a^b \frac{1}{2} \{[F(y)]^2 - [g(y)]^2\} dy,$$

$$\bar{y} = \frac{1}{A} \int_a^b y \{[F(y)] - [g(y)]\} dy,$$

Donde A = área total del polígono, integrando desde a hasta b siendo estos puntos coordenados pertenecientes a las funciones f(y) y g(y) que delimitan el área de los polígonos requeridos, determinando el área de cada lote de estudio.

Basados en mapas de elevación se fracciona el campo en grupos naturales, partiendo de un número de zonas específico mediante el *software* MZA⁴, el cual, a través de los índices de clasificación entrópica normalizada (NCE)⁵, modela la cantidad de desorganización de una partición C difusa en Y (Fridgen, 2003) y el fuzziness performance index (FPI); además de otros atributos topográficos (Figura 1).

Para verificar la variabilidad espacial de estos parámetros en el campo de estudio se toma la densidad constante para las superficies planas en este caso de estudio, donde se encuentra que el índice de fuzzy es cercano a 1, lo cual genera clases no significativas para delimitar diferentes zonas y con base en ellas asignar densidad diferenciada para el análisis con el centroide.

1 Parámetro que cuantifica la incertidumbre en el posicionamiento de un receptor GPS en el plano horizontal debido a la posición relativa de los satélites (*Horizontal Dilution of Precision*, en inglés).

2 Dosis configurada en el sistema de control para ser realizada por la máquina.

3 Dosis ejecutada efectiva por el sistema de control instalado en la máquina.

4 Management Zone Analyst Software for subfield Management Zone Delineation USDA.

5 NCE clasificación normalizada entropía.

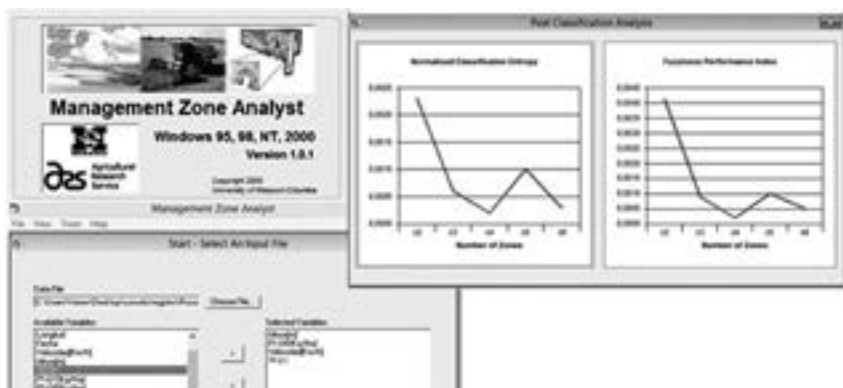


Figura 1. Representación gráfica del *software* empleado para este trabajo.

Concepto de clúster de aplicación según tasa de avance

El análisis de clúster consiste en aglomerar individuos similares en distintos géneros. La literatura verificada muestra diferentes opciones algorítmicas para agrupar datos (Tou & Gonzalez, 1974; Hartigan, 1975), pero no existe una teoría ampliamente aceptada de agrupación (Milligan & Cheng, 1996).

Al verificar los datos recolectados encontramos el valor de la tasa de avance diario 52,4 ha/día reflejada por la ejecución de la labor en varias campañas. Al hallar los centroides correspondientes a cada lote se realiza un análisis de proximidad donde se encuentran las distancias medias entre centroides. Así se plantean las siguientes restricciones:

$$(Ec. 2) \quad S = \sum_{i=1}^n w_i C_i \prod_{j=1}^m r_j$$

Donde: S = conjunto de lotes para la aplicación; W_i = peso del criterio i (C_i); C_i = criterio de idoneidad; R_j = restricción.

(Ec. 3)

$$\prod_{j=1}^m r_j = \left\{ \begin{array}{l} \text{restricción en contigüidad de lotes, restricción} \\ \text{distancia medida} < \text{prom distancia de traslado} \\ \text{medida, restricción de tasa avance } 300 \text{ has} < \Sigma \\ \text{áreas} < 400 \text{ has} \end{array} \right\}$$

Con base en ello se establece lo que denominamos clúster de aplicación, que en síntesis es el conjunto

de lotes que se pueden aplicar durante un tiempo determinado, basado en la tasa de avance diario encontrada con los datos, el análisis de proximidad y las restricciones aplicadas.

Al tener delimitada esta nueva superficie definida por días de trabajo, que representa para el caso de estudio el 30 % del tiempo utilizado para ejecutar la labor de fertilización en una campaña, es posible conglomerar los lotes o parcelas que van a componer nuestra nueva unidad de trabajo. El siguiente paso es hallar las coordenadas correspondientes al centroide geométrico de esta superficie, que indica el nuevo eje de operaciones (Figura 2).

Resultados

Como uno de los resultados se muestran las tablas de proximidad (Tablas 1, 2 y 3) calculadas a partir de los centroides hallados con los métodos previamente descritos, así como sus respectivas restricciones. Se adiciona una columna comparativa con el promedio de las distancias recorridas en traslados, reportadas en el sistema de adquisición de datos durante las campañas analizadas, verificando la disminución en la distancia recorrida planteada para cada lote. Cada clúster arroja un porcentaje de reducción, que es el resultado de minimizar las distancias recorridas para llegar a realizar la labor en cada uno de los lotes de aplicación. De esta manera, podemos ver claramente cómo al situarnos en los centros de gravedad de los clústeres mejoramos significativamente el desarrollo de la labor asignada.

Figura 2. Distribución de los centroides generales en una plantación de palma de aceite.



Tabla 1. Resultado comparación distancias recorridas SIG clúster 1.

| Tabla de proximidad del clúster 1 | | | | Distancia recorrida medida |
|-----------------------------------|--------|----------|---------------|----------------------------|
| Rango cercano | (m) | Near Fid | Near Dist | \bar{x} dist recor (mt) |
| 1 | 272,2 | 16 | 272.198.907 | 278,21 |
| 2 | 378,9 | 4 | 378.884.058 | 568,77 |
| 3 | 414,0 | 6 | 413.960.309 | 1316,91 |
| 4 | 545,3 | 8 | 545.295.588 | 1319,05 |
| 5 | 574,4 | 12 | 574.356.177 | 1139,83 |
| 6 | 603,9 | 2 | 603.933.731 | 1327,43 |
| 7 | 645,9 | 19 | 645.861.529 | 1123,21 |
| 8 | 714,6 | 15 | 714.640.748 | 1137,54 |
| 9 | 725,4 | 14 | 725.448.415 | 2094,33 |
| 10 | 811,4 | 17 | 811.442.197 | 2250,53 |
| 11 | 873,0 | 13 | 872.980.708 | 1696,24 |
| 12 | 912,3 | 11 | 912.253.035 | 1312,80 |
| 13 | 919,3 | 1 | 919.287.369 | 1691,98 |
| 14 | 106,6 | 10 | 106.568.391 | 1316,91 |
| 15 | 1080,2 | 3 | 1.080.207.555 | 1123,21 |
| 16 | 1163,8 | 9 | 1.163.848.968 | 2782,09 |
| 17 | 1170,8 | 18 | 1.170.816.903 | 2250,53 |
| 18 | 1181,5 | 5 | 1.181.486.242 | 2094,33 |
| 19 | 1308,1 | 7 | 1.308.060.413 | 2438,13 |
| 20 | 1515,8 | 0 | 1.515.846.371 | 3794,69 |
| \bar{x} dist centroide | 795,9 | | Page 1 of 1 | |
| % reducción | 0,4 | | | |

Tabla 2. Resultado comparación distancias recorridas SIG clúster 2.

| Tabla de proximidad clúster 2 | | | | Distancia recorrida medida |
|-------------------------------|--------|-------------|-------------------|----------------------------|
| Rango cercano | (mt) | Fid cercano | Distancia cercana | \bar{x} dist recor (m) |
| 1 | 258,4 | 15 | 258.367.921 | 752,26 |
| 2 | 319,9 | 14 | 319.874.071 | 566,79 |
| 3 | 339,2 | 12 | 338.210.624 | 941,85 |
| 4 | 393,2 | 16 | 393.162.296 | 2429,75 |
| 5 | 564,1 | 10 | 564.102.081 | 2444,24 |
| 6 | 604,1 | 17 | 604.105.123 | 1869,21 |
| 7 | 810,6 | 8 | 810.582.257 | 1685,87 |
| 8 | 816,7 | 18 | 816.702.935 | 752,26 |
| 9 | 940,5 | 13 | 940.529.931 | 2050,57 |
| 10 | 1045,0 | 6 | 1.045.048.995 | 1116,95 |
| 11 | 1065,0 | 2 | 1.064.952.318 | 3135,32 |
| 12 | 1121,1 | 11 | 1.121.051.882 | 1887,97 |
| 13 | 1262,8 | 4 | 1.262.814.831 | 2534,77 |
| 14 | 1268,0 | 0 | 1.267.971.808 | 1403,40 |
| 15 | 1319,2 | 9 | 1.526.185.895 | 1959,82 |
| 16 | 1409,9 | 3 | 1.409.853.308 | 1869,21 |
| 17 | 1526,2 | 7 | 1.526.185.895 | 1953,64 |
| 18 | 1697,8 | 1 | 1.697.780.056 | 2782,09 |
| 19 | 1733,4 | 5 | 1.733.415.431 | 2256,56 |
| \bar{x} dist centroide | 973,4 | | | |
| % reducción | 0,4 | | | |

Tabla 3. Resultado comparación distancias recorridas SIG clúster 3.

| Tabla de proximidad clúster 3 | | | | Distancia recorrida medida |
|-------------------------------|-------|-------------|-------------------|----------------------------|
| Rango cercano | (m) | Fid cercano | Distancia cercana | \bar{x} dist recor (m) |
| 1 | 211,6 | 4 | 211.592.964 | 1691,98 |
| 2 | 315,3 | 3 | 315.252.781 | 568,77 |
| 3 | 333,6 | 5 | 333.626.709 | 568,77 |
| 4 | 520,3 | 6 | 520.264.263 | 556,42 |
| 5 | 521,1 | 2 | 521.141.964 | 568,77 |
| 6 | 630,5 | 13 | 630.529.292 | 675,17 |
| 7 | 701,0 | 14 | 701.038.788 | 1137,54 |

Continúa →

Continuación Tabla 3. Resultado comparación distancias recorridas SIG clúster 3.

| Tabla de proximidad clúster 3 | | | | Distancia recorrida medida |
|-------------------------------|--------|-------------|-------------------|----------------------------|
| Rango cercano | (m) | Fid cercano | Distancia cercana | \bar{x} dist recor (m) |
| 8 | 709,3 | 16 | 709.336.189 | 1137,54 |
| 9 | 844,9 | 7 | 844.946.631 | 1894,22 |
| 10 | 961,2 | 15 | 861.215.713 | 1137,54 |
| 11 | 889,1 | 12 | 889.110.458 | 1116,95 |
| 12 | 927,7 | 1 | 927.674.248 | 2782,09 |
| 13 | 974,4 | 11 | 974.404.565 | 1403,40 |
| 14 | 990,9 | 9 | 990.941.649 | 1119,01 |
| 15 | 1076,1 | 10 | 1.076.091.965 | 1953,64 |
| 16 | 1105,9 | 0 | 1.105.928.479 | 1959,82 |
| 17 | 1222,5 | 8 | 1.222.532.892 | 2819,45 |
| \bar{x} dist centroide | 755,0 | | | |
| % reducción | 0,3 | | | |

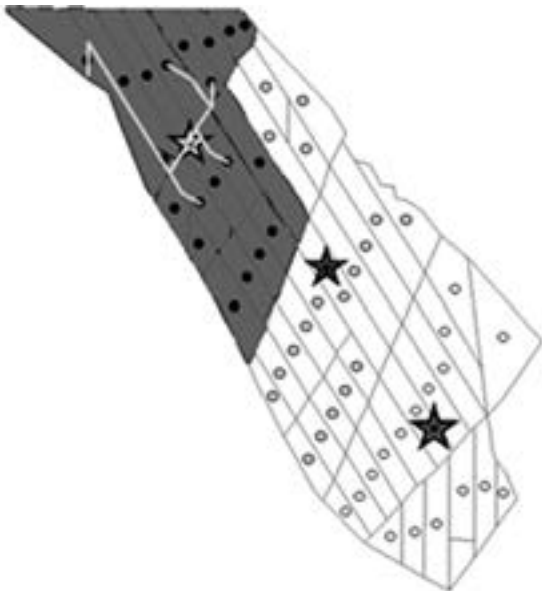
Análisis de recorridos: ruta crítica

Con los recorridos efectuados por el tractor podemos implementar una topología de red donde adjudicamos nodos a los cruces viales y a las entradas a cada lote. Asignando los valores de velocidad de recorrido, tiempos y distancias, además de otros parámetros como costos de trayecto y estado de la malla vial, encontramos rutas crí-

ticas para cada punto específico partiendo desde el centroide general del clúster definido hacia los respectivos de cada lote. Así logramos evaluar rutas, desplazamientos y otras acciones logísticas con anterioridad.

La Figura 3 muestra un análisis de recorrido con punto de inicio en el centroide del clúster 1 llegando a diferentes coordenadas específicas, parametrizado para recorrer la menor distancia posible.

Figura 3. Análisis de recorridos desde el centro de gravedad del clúster 1.



Conclusión

Los datos recolectados mediante los sistemas de posicionamiento automatizado llevados de manera ordenada, rigurosa, verificando el adecuado almacenamiento y su constante actualización, permiten efectuar múltiples posibilidades de análisis. Estos nos proveen herramientas fundamentales para tomar decisiones fácticas sobre la metodología de trabajo en nuestro cultivo. Con base en los resultados del presente estudio, al reposicionar nuestro centro de operaciones en los centros de gravedad hallados y delimitados por las restricciones establecidas, dis-

minuyen los tiempos de traslado en un promedio de 35 % con respecto a los requeridos con la metodología de operación común. Al realizar una nueva configuración de operación, y gracias a la información recolectada, es posible hacer un análisis de ruta crítica, planteando así la forma más adecuada de realizar una faena de aplicación optimizando rutas y recorridos internos. Además, al contar con una base de datos de recorridos, tiempos, velocidades promedio, entre otras variables, se puede modelar el desarrollo de las actividades haciendo un planeamiento más riguroso y exacto en el desarrollo de la labor, buscando elevar los niveles de eficiencia en campo.

Referencias bibliográficas

- ASAE EP496.3. (2009). Agricultural Machinery Management. St. Joseph: American Society of Agricultural and Biological Engineer.
- Bochtis, D. (2008). Minimising the non-working distance travelled by machines operating in a headland field pattern. *Biosystems Engineering*, 101(1), pp.1-12.
- Bochtis, D. (2009). Combine coverage and path planning for field operation. *Precision Agriculture*. In: E. J., van Henten, D., Goense, C., & Lokhorst (Eds.). *Proceedings of the 7th European Conference on Precision Agriculture*.
- Bochtis, D. (2010a). Machinery management in bio production systems: definitions and classifications of planning and scheduling aspects. *Agricultural Engineering International: research and development*, 12(2), 55-63.
- Bochtis, D. (2010b). The Vehicle routing problem in field logistics: part II. *Biosystems Engineering*, 105, 180-188.
- Bochtis, D., Sørensen, C., & Busato, P. (2014). Advances in agricultural machinery management: A review. *Biosystems engineering*, 126, 69-81.
- Derrett, B. B. (2006). *Ship Stability for Master and Mates*. Oxford: Elsevier Ltd.
- De Bruin, S. (2009). Spatial Optimisation of cropped swaths and field margins using GIS. *Computers and Electronics in Agriculture*, 68(2), 185-190.
- Esposito, G., Robledo, W., Bongiovanni, R., Ruffo, M. & Balboa, G. (2012). Dosificación variable de nitrógeno en maíz según el índice topográfico compuesto. En *Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo*. Mar del Plata, Argentina.
- Fridgen, N. E. (2003). Management Zone Analyst (MZA): *Software for Subfield Management Zone Delineation*. *Agronomy Journal*, 96(1), 25-32.
- Grisso, R. (2004). Field efficiency determination using traffic pattern indices. *Applied Engineering in Agriculture*, 20(5), 563-572.
- Hameed, I. (2013). Optimized driving direction based on a three dimensional field representation. *Computers and electronics in agriculture*, 91, 145-153.

- Hartigan, J. A. (1975). *Clustering Algorithms*. Hoboken: John Wiley & Sons.
- Hunt, D. (2001). *Farm Power and Machinery Management*. Ames, Iowa: Iowa State Press.
- Milligan, G. W., & Cheng, R. (1996). Measuring the influence of individual data points in a cluster analysis. *Journal of Classification*, 13(2), 315-335.
- Palmer, R. (2003). Improving the efficiency of field operations. *Biosystems Engineering*, 84(3), 283-288.
- Peart, R. (2004). *Agricultural Systems Management*. Boca Ratón: CRC Press.
- Sorensen, C. (2003). A model of field machinery capability and logistics: the case of manure. *Agricultural Engineering International Research and Development*. Manuscript PM 03 004. Vol. V.
- Spekken, M. (2013). Optimized routing on agricultural fields by minimizing maneuvering and servicing time. *Presicion Agriculture*, 14(2), 224-244.
- Tou, J. T., & Gonzalez, R. C. (1974). *Pattern Recognition Principles*. Boston: Addison-Wesley Publishing Company.

Secuestro de carbono para altos rendimientos de la palma de aceite*

Sequestering Carbon for High Oil Palm Yields

CITACIÓN: Pulver, E. (2019). Secuestro de carbono para altos rendimientos de la palma de aceite. Palmas, 40 (Especial, tomo I), 177-184.

PALABRAS CLAVE: secuestro de carbono en el suelo, estrés por sequía, mejoras de rendimiento, mantillo.

KEYWORDS: carbon sequestration in soils, drought stress, yield improvements, mulch.

*Artículo original recibido en inglés y traducido por Carlos Arenas París.



EDWARD PULVER
Asesor internacional
Intenational Advisor

Resumen

No existen otros cultivos agroindustriales que tengan tan mala fama como el de la palma de aceite. La deforestación, la destrucción del hábitat de la vida silvestre y la contaminación del aire producida por la combustión son apenas algunas de las descripciones negativas asociadas a este cultivo. Si bien la producción de palma de aceite en Colombia no ha surgido a expensas de grandes problemas ambientales, la imagen internacional salpica a todos los productores. Otro de los problemas que afronta Colombia a escala internacional es el rendimiento relativamente bajo y poco competitivo de su sector palmero, por lo que se hace necesario desarrollar un programa que haga énfasis en la producción ecológica y, en paralelo, estimule el rendimiento. Las principales regiones palmicultoras de Colombia muestran marcados períodos de sequía que varían de una región a otra, así como una disponibilidad de materia orgánica reducida, lo cual limita la retención de agua. Al respecto, la aplicación de mulch de racimos de fruta fresca, la colocación estratégica de hojas de poda y el uso eficaz de coberturas son medios para incrementar la

materia orgánica del suelo. Las observaciones realizadas en numerosos lotes cultivados demuestran que la adopción de estas sencillas prácticas permite incrementar por lo menos 1 % la materia orgánica del suelo, así como duplicar la retención de agua del cultivo de palma de aceite. Los efectos de agregar materia orgánica a los suelos son la reducción de las pérdidas de rendimiento por causa del estrés hídrico, el aumento de la infiltración de agua, la reducción de los costos de riego y el aumento de la eficiencia de los nutrientes, lo cual se traduce en un aumento significativo del rendimiento. Nuestro enfoque se asemeja a los del “cultivo de carbono” (*carbon farming*), el secuestro de carbono y la agricultura regenerativa, donde el uso de subproductos y coberturas con el fin de incrementar la materia orgánica del suelo tiene consecuencias benéficas sobre los gases de efecto invernadero; es decir, se secuestra más carbono en el suelo del que se emite como resultado de la producción. Sobre este escenario, Colombia debe fomentar la producción de palma ecológica de alto rendimiento, lo cual le daría a la producción nacional una ventaja competitiva frente a los demás países productores, demostrando que la producción de palma de aceite en Colombia puede ser parte de la solución del cambio climático.

Abstract

No other industrial crop suffers from such a bad image as oil palm. Deforestation, destruction of wildlife habitat and air pollution from burning are a few of the negative descriptions associated with this crop. Although oil palm production in Colombia has not occurred at the expense of the major environmental concerns, the international image affects oil palm producers worldwide. The other issue confronting Colombia on an international scale is the relatively low and uncompetitive yields. Therefore, oil palm agribusiness in this country needs to pursue a program that highlights ecofriendly production that simultaneously stimulates yields. The major palm producing regions in Colombia have a distinct dry season that is highly variable among regions and low soil organic matter that limits water retention. Mulch with empty fresh fruit bunches; strategically locating pruned leaves and effective use of cover crops are means of increasing soil organic matter. Observations from numerous farmers' fields demonstrate that soil organic matter can be increased by at least 1% year by these simple means and doubling water retention. The impact from additional soil organic matter is reduced yield losses due to water stress, increased water infiltration, reduced irrigation costs and greater nutrient efficiency, resulting in significantly higher yields. Our approach is similar to carbon farming, carbon sequestering and regenerative agriculture. Use of by-products and cover crops to increase soil organic matter is carbon sequestering that has a positive effect on greenhouse gases; that is, more carbon is sequestered in the soil than emitted from production. Colombia needs to promote high-yielding eco-friendly palm production thus giving national production a competitive edge. The work in Colombia clearly demonstrates that oil palm production can be part of the solution to climate change and not contribute to pollution.

□

Introducción

Existe evidencia convincente de que la producción de aceite de palma genera consecuencias ambientales graves. Lo más importante es la pérdida del *stock* de carbono sobre el suelo (SCS) cuando el bosque o turba se convierte a palma de aceite; conocido comúnmente como cambio del uso de la tierra (CUT) (Gibbs *et al.*, 2010; Henson, 2009; Lucey *et al.*, 2014; Wicke *et al.*, 2008). Un bosque tropical tiene apro-

ximadamente 400 t/ha de carbono almacenado, en contraste con una plantación madura de palma, que posee menos de 100 t/ha de carbono secuestrado (Barthel *et al.*, 2018). Es obvio que cuando un bosque se convierte en palma hay una pérdida neta de carbono secuestrado, emitido como CO₂, que contribuye a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (Chase & Henson, 2010; Henson, 2009).

Por otra parte, el drenaje de los suelos de turba para el cultivo de palma, común en algunas partes del Sudeste Asiático, es aún más perjudicial, dado que el carbono secuestrado en la turba se estima en 1.500 t/ha (Koh *et al.*, 2011; Miettinen *et al.*, 2016). En conclusión, el CUT de suelos de bosque y turba para cultivar palma de aceite está contribuyendo a la generación de GEI, resultando en la caracterización de la palma de aceite como un “cultivo sucio” desde la óptica ambiental (Boucher *et al.*, 2011). Esta reputación está basada en las prácticas de Malasia e Indonesia, lo cual es entendible, desde una perspectiva global, dado que estos dos países representan más del 85 % de la producción mundial de palma de aceite.

En contraste con el Sudeste Asiático, el cultivo de palma en Colombia se ha desarrollado sobre pastos de baja biomasa y, en menor medida, arroz pluvial de mínima productividad (Henson *et al.*, 2012a; Henson, *et al.*, 2012b), cuyo secuestro de carbono se estima en menos de 40 t/ha para los pastizales (pastos no mejorados) y en menos de 5 t/ha para el caso de arroz pluvial. Sobre este tema, Henson *et al.* (2012b) reportaron que en todo el país el saldo de GEI era positivo, puesto que el total del carbono secuestrado por el cultivo de palma de aceite superaba las emisiones en más de 12.000 t/año. Este fenómeno hace que Colombia sea “única” en el mundo de la palma.

La información sobre las emisiones de GEI causadas principalmente por CUT se concentra en los *stocks* de SCS. Adicionalmente, los resultados muestran que el progreso de la palma de aceite en Colombia está ocurriendo con una clara conciencia ambiental. Este informe discute un tema que ha sido fuertemente promovido en el país: el secuestro de carbono en el suelo. Se hace énfasis en las actividades de Extensión que buscan fomentar el uso de residuos de cultivos y cultivos de cobertura para aumentar el material orgánico del suelo, el secuestro de carbono y, simultáneamente, los rendimientos.

Secuestro de carbono en el suelo

El suelo es el principal medio de almacenamiento del carbono producido por fotosíntesis (Swift, 2001). Se estima que el suelo acumula una mayor cantidad de carbono que la vegetación y la atmósfera de la tierra combinadas. Una plantación madura

de palma tiene aproximadamente 100 t/ha de carbono almacenado en los componentes que se encuentran por encima del suelo. Un suelo que contiene 2 % de materia orgánica tendrá cerca de 80 t/ha de este. El secuestro de C en el suelo ofrece un medio para mitigar el cambio climático. Además, la materia orgánica mejora la salud del suelo, aumentando la infiltración de agua, la capacidad de retención de agua y de nutrientes, al tiempo de apoyar la actividad microbiana beneficiosa.

El secuestro de carbono es altamente variable, pues depende de la composición y cantidad de biomasa, las propiedades fisicoquímicas del suelo y los factores ambientales. En el caso de la palma de aceite, la cantidad de carbono secuestrado se ve altamente afectada por el volumen de materia agregada al suelo, principalmente frondas, racimos de fruta fresca vacíos (RFFV) y residuos de cultivos de cobertura, los cuales serán abordados a continuación.

Frondas

La poda resulta en el reciclaje de biomasa y su cantidad depende de la edad, la nutrición, las condiciones hidrológicas, la incidencia de enfermedades/insectos y el material genético de la planta. Normalmente, las frondas frescas contienen aproximadamente 30 % de materia seca o 15 % de C. Se podan cerca de 25 frondas por palma en el año y en un cultivo maduro cada una pesará más o menos 3 kg, lo que equivale a 3 t/ha de materia seca asumiendo una población de 125 palmas/ha. Los híbridos producen frondas mucho más grandes, con aproximadamente 6 kg/fronda de peso fresco, resultando en un total de materia seca de casi 5 t/ha. Estos estimativos están basados en determinaciones hechas en la plantación por el personal de Extensión; sin embargo, en la literatura publicada, el reciclaje de frondas es altamente variable, entre 2 y 7 t/ha de materia seca.

Racimos de fruta fresca vacíos (RFFV)

La cantidad de C almacenada en los RFFV es directamente proporcional al rendimiento. Por lo general, los RFFV representan 40 % del peso fresco del racimo de fruta fresca (RFF). En consecuencia, un rendimiento de campo de 20 t/ha de RFF resultará en aproxima-

mente 8 t/ha de RFFV, lo que da como resultado 3,2 t/ha de materia orgánica seca con un rendimiento de campo de 20 t/ha. Cada vez es más frecuente procesar (prensar) los RFFV para remover pequeñas cantidades de aceite restante. Esto resulta en un producto que puede ser utilizado para absorber el efluente de la molienda del aceite de palma mediante compostaje. Esta técnica no afecta el secuestro de C en el suelo de los RFFV, pero tiene la ventaja añadida de que reduce significativamente las emisiones de metano del efluente (Rodríguez *et al.*, 2015).

Cultivos de cobertura

En Colombia se promueven tres cultivos de cobertura: *Mucuna bracteata*, *Mucuna pruriens* y *Desmodium maquenque*. La selección del cultivo de cobertura depende de su objetivo de uso, ya sea el establecimiento rápido, la facilidad de manejo o la capacidad para suprimir especies de gramíneas. En términos de producción de biomasa, en la región de los Llanos Orientales se prefiere el uso de *M. bracteata*, ya que es capaz de producir 2,8 t/ha de materia seca; sin embargo, esta también es la más difícil de manejar y debe ser cortada frecuentemente para evitar que trepe a la palma (Delgado *et al.*, 2015).

Se estima que la biomasa total de frondas recicladas, RFFV y cultivos de cobertura es de aproximadamente 10 t/ha de materia orgánica seca, con cada fuente aportando un tercio del total. Esto representa aproximadamente 5 t/ha de carbono al año que puede ser secuestrado en el suelo, sin considerar las pérdidas por la oxidación de la superficie durante la descomposición. El uso efectivo de los residuos de cultivos y los cultivos de cobertura para secuestrar el carbono del suelo, la reducción del metano GEI potencial por medio del compostaje de los RFFV y los efluentes de la molienda,

mejoran aún más la “singularidad” de la producción de palma de aceite en Colombia.

Uso de materia orgánica reciclada para mejorar la productividad

Las preocupaciones ambientales son un componente principal de la producción moderna de palma de aceite en Colombia. No obstante, las prácticas que son ambientalmente sólidas también deben ser económicamente viables para que los agricultores avancen hacia su adopción. Si bien hay diferencias entre las regiones, todas tienen un periodo de sequía. Se estima que el déficit hídrico en la Zona Oriental palmera es de aproximadamente 250 mm durante tres meses y en la Zona Central cercano a 200 mm en dos meses. En la Zona Norte el déficit es mucho más pronunciado, alcanzando los 600 mm durante los meses (4-5) de la temporada seca. Utilizando la “regla general” de que un déficit de agua de 100 mm reduce el rendimiento potencial en 10 %, se estima que las pérdidas en las zonas Oriental y Central son de aproximadamente el 25 % y de más del 60 % en la Zona Norte.

Casi todos los suelos en las regiones de cultivo de palma de aceite en Colombia han sido caracterizados como de baja materia orgánica (menos del 2 %) y con propiedades de textura que resultan en una capacidad de retención del agua limitada (Saxton & Rawls, 2006). Se estima que la demanda de agua del cultivo durante la temporada seca es de 1.500 m³/ha/mes, asumiendo una ETP de 150 mm/mes, y en la Zona Norte puede superar los 200 mm durante enero-febrero. Además, las propiedades del suelo limitan la capacidad de retención del agua a tan solo 500-800 m³, indicando que en las zonas Oriental y Central solo hay suficiente agua almacenada en el suelo para satisfacer

aproximadamente 15 días de demanda, lo cual significa que el cultivo sufrirá estrés hídrico durante, al menos, 45 días. Por su parte, en la Zona Norte es suficiente para tan solo 10 días, indicando que se requieren cuatro irrigaciones al mes para eliminar el estrés hídrico.

La selección del cultivo de cobertura depende de su objetivo de uso, ya sea el establecimiento rápido, la facilidad de manejo o la capacidad para suprimir especies de gramíneas.

La materia orgánica del suelo tiene grandes efectos sobre la retención de agua del suelo (Huntington, 2007). La diferencia entre el agua retenida a la “capacidad del campo” y el “punto permanente de marchitez” se define como la capacidad disponible de agua (CDA), la cual está directamente relacionada con la materia orgánica del suelo, dado que aumenta la cantidad de agua retenida a capacidad de campo muy por encima del punto de marchitez. En suelos de textura ligera, un incremento de 1 % en la materia orgánica acrecienta el volumen de agua retenida a capacidad de campo en más del triple, pero no tiene efectos sobre el agua retenida en el punto de marchitez, resultando en un aumento significativo en la CDA. En suelos de textura pesada, el volumen de agua retenido a capacidad de campo se eleva en cinco veces por cada aumento porcentual en la materia orgánica del suelo, mientras que el agua retenida en el punto de marchitez no cambia. La materia orgánica incrementa la retención de agua al alterar la estructura del suelo que aumenta su porosidad y, por lo tanto, la infiltración de agua.

Es pertinente mencionar que la materia orgánica del suelo altera enormemente la actividad microbiana y promueve las lombrices de tierra. Mejoras en la textura del suelo, la retención e infiltración de agua, junto con mayores sustratos por la descomposición de materia orgánica, producen un buen ambiente para la formación de raíces. Poco tiempo después de la aplicación de materia orgánica y debajo de esta, es común observar el crecimiento de raíces alimentadoras, cuya concentración permite la administración de fertilizantes directamente encima del mantillo, elevando así su eficiencia.

Mejorar la materia orgánica del suelo no es una tarea fácil. Aumentarla en 1 % dentro de una superficie de 50 cm requeriría casi 50 t/ha de materia orgánica seca. Anualmente, solo hay cerca de 10 t/ha de biomasa disponible de frondas, RFFV y cultivos de cobertura. Aunque existen varios informes respecto a la aplicación de RFFV en la palma, la mayoría han estado enfocados al reciclaje de nutrientes y utilizan grandes cantidades con varias aplicaciones anuales (Bakar *et al.*, 2011; Tao *et al.*, 2017). Sin embargo, en el trabajo reportado se observan aumentos en la materia orgánica del suelo, confirmando que el secuestro de carbono en el suelo con residuos de palma es posible.

En resumen, la cantidad total de biomasa que se recicla de la producción es significativa y puede resultar en un mayor secuestro de C en el suelo. No obstante, el aumento en la retención de agua del suelo debido a la aplicación de residuos de palma no ha sido estudiado, presumiblemente debido a la falta de estrés hídrico en Malasia, país que tiene una precipitación anual uniforme. Por lo general, las mejoras en la materia orgánica del suelo son a largo plazo debido a la disponibilidad limitada de residuos del cultivo y/o a los costos asociados con su transporte y aplicación en campo.

Creación de sumideros

Es claro que mejorar la materia orgánica del suelo en toda la superficie de un cultivo de palma no es posible desde una perspectiva práctica. Para superar esta limitación, la materia orgánica se aplica a un área de influencia alrededor de cada palma. Al ser mucho más pequeña, la cantidad requerida se reduce, pero sigue siendo adecuada para aumentar la retención de agua del suelo de manera significativa y, posteriormente, el rendimiento. El área superficial de influencia de una palma madura es de aproximadamente 70 m², asumiendo una población de 142 palmas/ha. La zona de raíz activa de un árbol maduro se concentra dentro de los primeros 50 cm del perfil del suelo, resultando en un volumen de cerca de 35 m³. Asumiendo una demanda de agua de 1.500 m³/mes (ETP de 150 mm), se debe almacenar dentro de 35 m³ para cumplir con los requisitos hídricos del cultivo, lo que representa un total de 10,5 m³/palma/mes.

Un anillo alrededor de la palma que comience en la línea goteo ocupa aproximadamente 20 m² y tiene un volumen de 10 m³, asumiendo una zona de raíz activa de 50 cm. Toda la materia orgánica se concentra en esta área, creando un “sumidero” o “banco” donde se puede almacenar el agua. Si bien el banco representa solo el 28 % del área, el rápido aumento en materia orgánica le permite retener un volumen de agua igual o mayor al 72 % restante. La aplicación continua de materia orgánica en el sumidero resulta en un rápido incremento de esta en el suelo y, tan solo cuatro años después, se puede almacenar agua adecuada para satisfacer por completo la demanda mensual en áreas de estrés hídrico limitado, tales como las zonas Oriental y Central.

El volumen del banco no es constante y se puede ampliar con el tiempo, dependiendo de la disponibilidad de materia orgánica. En el programa de Extensión es común comenzar a formar el anillo con RFFV y extender su tamaño utilizando frondas podadas y/o cortes de los cultivos de cobertura. El uso de estos últimos como mantillo se conoce como “cultivo de carbono” y, actualmente, es la tecnología agrícola más promovida en los Estados Unidos y en el Reino Unido.

Impacto sobre el rendimiento

El programa de Extensión de Cenipalma está enfocado en mejorar el rendimiento de los cultivos de palma de aceite en Colombia, siendo el uso de sumideros con alto contenido de materia orgánica uno de los principales objetos de estudio. En las fases iniciales, el apoyo del Fondo Común para Productos Básicos (*Common Fund for Commodities*) permitió que el trabajo incluyera a Ecuador. En este país, en menos de dos años mejoró el rendimiento de 22 fincas en 40 %. En Colombia, la mejora varía entre 4-7 t/ha/año y se estima que más de 120.000 ha están utilizando esta tecnología.

El impacto sobre el rendimiento es rápido. Dentro de los primeros seis meses se observaron aumentos significativos en el peso de los RFF y un año después se evidenció una mayor producción de RFF. La hipótesis es que los resultados inmediatos se deben a la mejor retención del agua, lo que permite que el RFF se llene completamente durante la sequía, evitando el aborto en las etapas tempranas del periodo reproductivo. Esto es inusual, ya que casi todos los reportes de incrementos de rendimiento en la palma solo se observan después de una fase de retraso de dos años. Adicionalmente se puede evidenciar la proliferación de raíces alimentadoras dentro del sumidero tan solo 30 días después de la aplicación de RFFV, permitiendo el uso de fertilizante solo sobre la materia orgánica, lo que aumentó en gran medida su eficiencia.

Conclusiones

Es poco común tener la oportunidad de impactar el rendimiento y los efectos ambientales de manera positiva, principal objetivo del programa de Extensión de Cenipalma. No obstante, existen otros factores in-

volucrados que deben ser abordados simultáneamente, tales como el manejo del agua (drenaje e irrigación efectiva), una nutrición balanceada de los cultivos y el manejo de plagas y enfermedades.

Un factor disuasivo importante para la adopción de esta tecnología es el costo presumido, especialmente respecto al uso de RFFV. Ubicar las frondas podadas en un área predeterminada es bastante simple, pues solo requiere capacitar al personal de campo. En contraste, el transporte y aplicación en campo de los RFFV suele verse como un costo y no como una inversión. Al respecto, los datos de campo de varios miles de hectáreas muestran con claridad que la relación costo-beneficio del uso de RFFV es de aproximadamente 1:4. En la mayoría de los casos, los costos de transporte y aplicación de RFFV en campo se recuperan dentro del primer año siguiente a su aplicación. En ambos casos, los beneficios se derivan de aumentos significativos en el rendimiento. Debido a las dificultades asociadas con la aplicación de RFFV y la disponibilidad limitada, la Unidad de Extensión de Cenipalma recomienda la aplicación de 200 a 300 kg RFFV/palma durante el primer año. En los siguientes, las frondas podadas y, en menor medida, los cultivos de cobertura, son la fuente de materia orgánica. Por lo general, los agricultores vuelven a aplicar RFFV en el año cuatro o cinco. Este procedimiento limita las inversiones iniciales, pero sigue produciendo resultados inmediatos en la mejora del rendimiento.

La aplicación de RFFV puede ser mecanizada, así como el corte de los cultivos de cobertura; sin embargo, pocas plantaciones en Colombia han mecanizado la aplicación de RFFV. Sobre este aspecto, es pertinente mencionar que se requieren más trabajos de investigación sobre la mecanización de esta práctica en el uso de los cultivos de cobertura, aunque pareciera que no es difícil.

El reciclaje de materia orgánica de las frondas podadas y RFFV junto con el uso de cultivos de cobertura produce un aumento en el secuestro de carbono del suelo y una posterior reducción en los GEI, y al mismo tiempo mejora la salud y la retención de agua del suelo, lo que resulta en una mayor productividad, estableciendo una situación “gana-gana” para el productor de palma de aceite y el medioambiente.

Referencias

- Bakar, R., Darus, S., Kulaseharan, S., & Jamaluddin, N. (2011). Effects of ten-year application of empty fruit bunches in an oil palm plantation on soil chemical properties. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 89(3), 341-349.
- Barthel, M., Jennings, S., Schreiber, W., Sheane, R., Royston, S., Fry, J., Leng-Khor, Y., & McGill, J. (2018). *Study on the environmental impact of palm oil consumption and on existing sustainability standards*. Report prepared by 3keel and LMC International for European Union. Available on-line.
- Boucher, D., Elias, P., Lininger, K., May-Tobin, C., Roquemore, S., & Saxon, E. (2011). *The root of the problem: What's driving tropical deforestation today?* Report by The Union of Concerned Scientists.
- Chase, L. D. C., & Henson, I. (2010). A detailed greenhouse gas budget for palm oil production. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 8, 199-214.
- Delgado, T., Rincón, A., & Molina, D. (2015). Establecimiento y manejo de leguminosas como cobertura en el cultivo de la palma de aceite. En: *Mejores prácticas agroindustriales del cultivo de la palma de aceite en Colombia* (pp. 133-154). Bogotá: Fedepalma.
- Gibbs, H. K., Ruesch, A., Achard, F., Clayton, M., Holmgren, P., Ramankutty, N., & Foley, J. (2010). Tropical forests were the primary sources of new agricultural land in the 1980s and 1990s. *Proceedings of the National Academy of Science*, 107, 16732-16737.
- Henson, I. E. (2009). Modelling carbon sequestration and greenhouse gas emissions associated with oil palm cultivation and land-use change in Malaysia. A re-evaluation and a computer model. *MPOB Technol*, 31, 116.
- Henson, I. E., Ruiz, R., & Romero, H. M. (2012a). The greenhouse gas balance of the oil palm industry in Colombia: a preliminary analysis. I. Carbon sequestration and carbon offsets. *Agronomía Colombiana*, 30(3), 359-369.
- Henson, I. E., Ruiz, R., & Romero, H. (2012b). The greenhouse gas balance of the oil palm industry in Colombia. II. Greenhouse gas emissions and the carbon budget. *Agronomía Colombiana*, 30(3), 370-378.
- Huntington, T. G. (2007). Available water capacity and soil organic matter. In: *Encyclopedia of Soil Science* (Second Edition). New York: Taylor and Francis.
- Koh, L. P., Miettinen, J., Liew, S. C., & Ghazoul, J. (2011). Remotely sensed evidence of tropical peatland conversion to oil palm. *Proceedings of the National Academy of Science*, 108(12), 5127-5132.
- Lucey, J., Hill, J., van der Meer, P., Reynolds, G., & Agus, F. (2014). *Change in carbon stocks arising from land-use conversion to oil palm plantations: A science-for-policy paper for the Oil Palm Research-Policy Partnership Network*. Heslington, U. K.: University of York.
- Miettinen, J., Shi, C., & Liew, S. (2016). Land cover distribution in the peatlands of Peninsular Malaysia, Sumatra and Borneo in 2015 with changes since 1990. *Global Ecology and Conservation*, 6, 67-78.
- Saxton, K. E., & Rawls, W. J. (2006). Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 70, September-October.
- Rodríguez, D. T., Ramírez, N., & García-Núñez, J. (2015). Evaluación de la incidencia de la producción de compost, usando biomasa de la planta de beneficio, en la huella de carbono del aceite de palma. Estudio de caso. *Palmas*, 36(1), 27-39.
- Swift, R. S. (2001). Sequestration of carbon by soil. *Soil Science*, 166(11), 858-871.

- Tao, H., Snaddon, J., Slade, E., Caliman, J., Widodo, R., Suhardi, & Willis, K. (2017). Long-term crop residue application maintains oil palm yield and temporal stability of production. *Agron. Sustain Dev.*, 37, 33.
- Wicke, B., Sikkema, B., Dornburg, V., Junginger, H. M., & Faaij, A. (2008). *Drivers of land use change and the role of palm oil production in Indonesia and Malaysia. Overview of past developments and future projections*. Utrecht, The Netherlands: Copernicus Institute Science, Universiteit Utrecht.

Métodos de inteligencia artificial (IA) para aplicaciones de teledetección de palma de aceite*

Artificial Intelligence (AI) in Oil Palm Remote Sensing Applications

AUTORES: Helmi Zulhaidi Mohd Shafri, Muhammad Mustafa Al-Habshi, Nur Shafira Nisa Shaharum, Departamento de Ingeniería Civil y Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial (GISRC), Facultad de Ingeniería, Universiti Putra Malaysia; Nasrul Ikhwan Naba, Digdat Sdn Bhd, B7-M Dataran Palma.

CITACIÓN: Mohd-Shafri, H. Z., Al-Habshi, M. M., Shaharum, N. S. N., & Naba, N. I. (2019). Métodos de inteligencia artificial (IA) para aplicaciones de teledetección de palma de aceite. *Palmas*, 40 (Especial Tomo I), 185-193.

PALABRAS CLAVE: inteligencia artificial, aprendizaje automático, big data, computación en la nube, agricultura de precisión, internet de las cosas (IoT), sostenibilidad.

KEYWORDS: Artificial intelligence, machine learning, big data, cloud computing, precision agriculture, internet of things (IoT), sustainability.

*Artículo original recibido en inglés y traducido por Carlos Arenas París.



HELMI ZULHAIDI MOHD SHAFRI
Facultad de Ingeniería, Universiti Putra
Malaysia
Faculty of Engineering, Universiti Putra
Malaysia

Resumen

Nos encontramos en la era de la Cuarta Revolución Industrial o la Industria 4.0 (RI 4.0). Las tecnologías emergentes bajo esta incluyen la inteligencia artificial (IA), la robótica, la nanotecnología, la biotecnología y el internet de las cosas (IoT), solo por nombrar algunas. Es necesario encontrar maneras de incorporar los elementos de la RI 4.0 a nuestro enfoque para enfrentar los desafíos del sector agrícola, creando el término agricultura 4.0. Para la agroindustria de la palma de aceite, la adopción de tecnologías avanzadas es el camino a seguir para garantizar su sostenibilidad y viabilidad. Una acción importante que debe tomarse es la captura de la información de las plantaciones mediante la tecnología geoespacial. La teledetección es un componente crucial ya que contribuye a la plantación digital (no es claro “plantación digital”). Se pueden generar mapas y bases de datos de las plantaciones de palma de aceite a partir de

varios sensores y plataformas. También, se pueden realizar mediciones espectrales en terreno, utilizando espectrorradiómetros de campo e imagen para desarrollar bibliotecas espectrales de la palma de aceite como referencia, así como para determinar las características espectrales importantes para determinar la condición de las mismas. Los sistemas aéreos pueden ser dirigidos y equipados con sensores de alta resolución para mapear las plantaciones en detalle, lo mismo que aquellos equipados en satélites que lo harían a escalas nacionales y regionales con fines de monitoreo. Ciertas técnicas que igual incluyen métodos de IA son fundamentales para entender las señales e imágenes capturadas por estos sensores. Bajo el dominio de la IA, las técnicas de aprendizaje automático (AA) son esenciales para todos los tipos de información de teledetección. Los datos de espectroscopia de campo y el AA ayudan a identificar bandas significativas y crear índices especiales para condiciones específicas. Para los datos obtenidos de aeronaves o vehículos aéreos no tripulados (VANT), el AA permite realizar el conteo y la clasificación de las palmas. En términos del uso de satélite para el mapeo de distribución y cambios de palma de aceite a gran escala, las técnicas combinadas de computación en la nube y AA están abriendo el camino para un cambio de paradigma en el mapeo a gran escala. Los datos geoespaciales recolectados serán parte de la información necesaria para la administración de las plantaciones modernas de palma de aceite dentro del contexto de la agricultura 4.0. Esta sesión de apertura revisa cuestiones relacionadas con el tema.

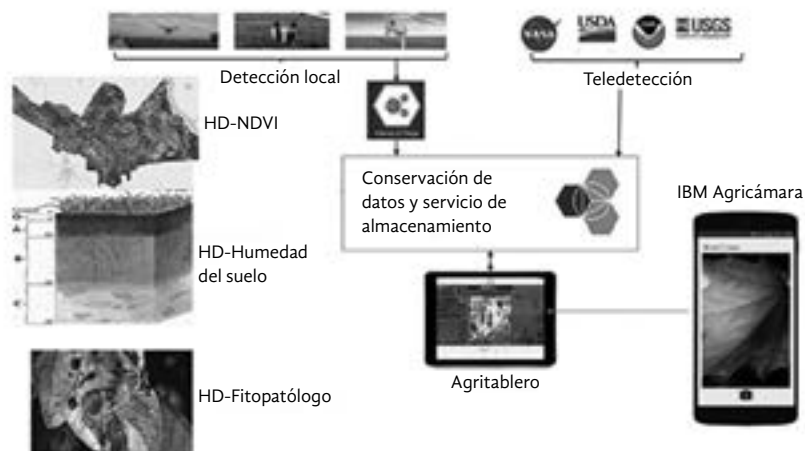
Introducción

En la era de la revolución industrial 4.0 (RI 4.0), el sector agrícola también está adoptando tener su propia agricultura 4.0. Bajo este avance tecnológico, varias secciones de la agroindustria de la palma de aceite están experimentando innovaciones significativas. Entre otras, el manejo modernizado de la plantación en diferentes escalas espaciales.

El progreso en la tecnología geoespacial y de la información (TI) permite el desarrollo de infraestructuras y proveedores de datos, con el fin de apo-

yar ciertos componentes importantes de la modernización de las plantaciones de palma de aceite, tales como la agricultura de precisión, el internet de las cosas (IoT) y programas para el monitoreo de la sostenibilidad. La teledetección es una de las tecnologías que suministra datos críticos para permitir la implementación de la agricultura 4.0. En segundo lugar, el análisis de datos es esencial porque contiene información relevante para los agricultores y gerentes de plantaciones. La Figura 1 muestra un concepto de cómo se puede utilizar la teledetección de datos en un entorno agrícola moderno.

Figura 1. Integración de teledetección utilizando el IoT y servicios de computación en la nube en la agricultura de precisión (adaptado de IBM, 2018).



La teledetección puede definirse como una técnica para la adquisición de información geoespacial, utilizando sensores y dispositivos que no están en contacto directo con los objetivos. Por lo general, se puede dividir en sistemas de teledetección activos y pasivos. Los pasivos involucran los que dependen de la luz solar para generar señales reflejadas, que son capturadas por los sensores. Algunos ejemplos de estos incluyen los sistemas multispectrales e hiperspectrales. Por otra parte, los activos comprenden sensores que emiten su propia energía y luego capturan las señales reflejadas, como ejemplos están los sistemas de radar y lidar.

A continuación, nos centraremos en los sistemas pasivos y discutiremos los métodos de análisis de datos relacionados, basados en inteligencia artificial (IA) y aprendizaje automático (AA) en el contexto del manejo y monitoreo de los cultivos de palma de aceite, para apoyar la implementación de la agricultura 4.0. Dado que se pueden adquirir datos de teledetección utilizando tres plataformas diferentes (de campo, aérea y espacial), la primera sección abordará los sensores y plataformas de datos de campo, incluyendo ejemplos de implementaciones de AA. La segunda, los sistemas aéreos, que incluyen plataformas con piloto y VANT, y cómo los algoritmos de AA procesan estos datos. La tercera, incluye las aplicaciones de algoritmos de AA para el procesamiento de imágenes de teledetección de palma de aceite adquiridas por satélites. Posteriormente, se discutirá el marco que combina todos estos datos y plataformas para la agricultura de precisión, y se concluirá con los desafíos y oportunidades a futuro.

Sistemas basados en campo

Los datos de teledetección de campo pueden ser recolectados por varios sensores, tales como una sencilla cámara de rojo, verde, azul (RGB) o los multispectrales e hiperspectrales más avanzados. En términos del estudio de la palma de aceite, los espectrorradiómetros de campo son los más utilizados por los investigadores para la recolección de datos espectrales terrestres, ya que se pueden usar para establecer una base de datos de referencia y determinar evaluaciones fundamentales. La mayoría de estudios emplearon espectrómetros de campo para determinar la viabilidad de los sistemas ópticos de teledetección, y detectar cambios sutiles en las propiedades espectrales debido a la presencia de enfermedades o a la falta de nutrientes. En la literatura se ha reportado cierto nivel de éxito. Estudios más recientes han adoptado métodos de IA, tales como la red neuronal artificial (RNA) para identificar las bandas y características importantes (Golhani *et al.*, 2018; Liaghat *et al.*, 2014).

A pesar del éxito, continúan los desafíos para encontrar una técnica que sea más práctica y económica para ser implementada en el campo. Es necesario desarrollar dispositivos más baratos y simples para suministrar un uso más robusto y amigable con el usuario. El camino a seguir será el empleo de espectrorradiómetros de campo avanzados basados en imágenes, como los sistemas Cubert o el móvil Specim IQ. Estos, como los mostrados en la Figura 2, permitirán una mayor practicidad para adquirir datos de campo, tales como espectros e imágenes de referencia de la condición de las palmas de aceite o aplicaciones para la madurez del fruto.



Figura 2. Sistemas de recolección de datos que utilizan avanzadas cámaras de imagen Specim IQ y Cubert.

Sistemas aéreos

Antes del uso común de los vehículos aéreos no tripulados (VANT), se solían utilizar aeronaves y helicópteros para la adquisición de datos hiperespectrales aéreos (Shafri *et al.*, 2012; Izzuddin *et al.*, 2015), que han demostrado ser efectivos para mapear los cultivos de palma de aceite en grandes áreas. Sin embargo, su principal problema es el costo que implica volar la aeronave y la iluminación variable debido a las nubes y sombras en un entorno tropical malayo.

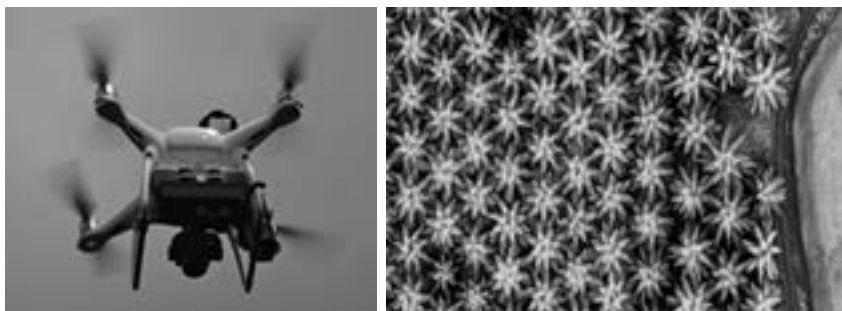
Los VANT se están convirtiendo en la plataforma más versátil y popular para adquirir datos de teledetección debido a sus bajos costos, facilidad de operación y flexibilidad. Hoy en día, el uso de VANT o drones es una manera rentable y eficaz de realizar una variedad de trabajos, incluyendo levantamientos topográficos, mapeo y adquisición de datos de alta resolución temporal y espacial con datos de teledetección. En la implementación de la agricultura de precisión, es común el uso de varias aplicaciones agrícolas en el campo para mapear, monitorear, rociar pesticidas, entre otros. El uso de cámaras RGB estándar es el más común, pero podría tener limitaciones en términos del análisis del contenido de la información (Kalan-tar, 2017; Sastrohartono *et al.*, 2016). Las cámaras multiespectrales con cuatro o cinco bandas permiten realizar un mapeo más preciso de las condiciones y salud de los cultivos. Un ejemplo es el MicaSense Red Edge o Sequoia.

En términos de análisis de datos con IA, un número limitado de bandas también restringe el estudio avanzado de la condición del cultivo, pero el uso de métodos como el aprendizaje profundo podría ser útil para aplicaciones como la detección y conteo de palmas. Recientemente una compañía privada en

Malasia, BigDat Sdn Bhd, obtuvo los derechos como único distribuidor y proveedor de servicios de un avanzado sensor multiespectral a bordo de VANT. El sensor, conocido como MicaSense Red Edge, puede ser utilizado para adquirir cinco bandas, abarcando el espectro visible y del infrarrojo cercano. La versatilidad y calidad de los datos permiten una rápida adquisición y análisis de datos, casi que en tiempo real, antes de que los agricultores o administradores de plantaciones puedan tomar cualquier decisión. La Figura 3 muestra un sistema multiespectral basado en VANT, utilizado para adquirir datos multiespectrales de cinco bandas con resolución muy alta y que emplea el sensor MicaSense Red Edge sobre una plantación de palma de aceite. Este permite recolectar datos de gran calidad, que pueden explorarse con fines de mapeo y monitoreo usando IA. La mayoría de las técnicas actuales, basadas en los índices espectrales y la aplicación de algoritmos de aprendizaje automático para el mapeo de palma de aceite desde VANT, aún son limitadas. Bahrom (2018) investigó el uso de redes neuronales artificiales (RNA) en la detección de palmas de aceite infectadas con *Ganoderma* utilizando los datos de una cámara RGBNIR en un VANT, e identificó el potencial para mejorar este método aún más con base en la optimización de parámetros.

El uso de datos hiperespectrales basados en VANT para el monitoreo de la palma de aceite aún es restringido debido al costo del sensor y al riesgo asociado con el manejo de la plataforma. Por lo tanto, esta área es una brecha de investigación obvia y en este momento continúa siendo estudiada, con una implementación práctica limitada. UPM ha adquirido un sensor hiperespectral de OCI-BaySpec. En el momento, el proceso de integración y configuración del sistema para el mapeo de palma de aceite está en curso.

Figura 3. El sensor MicaSense a bordo de un VANT sobre una plantación en Malasia.



Sistemas espaciales

Los problemas de sostenibilidad de la palma de aceite están a la vanguardia. La expansión del área cultivada requiere un control estricto para evitar la pérdida adicional de bosque y biodiversidad (Fitzherbert *et al.*, 2008), especialmente en las tierras con un alto valor de conservación. La teledetección por satélite ha sido reconocida como la tecnología que puede ser utilizada para monitorear el estado y los cambios del suelo en una gran área y en periodos diferentes. Como la palma de aceite se siembra en vastas zonas del este y en Malasia peninsular, esta especie requiere una gran cantidad de datos, instalaciones informáticas y experiencia en el estudio de imágenes de teledetección (Lee *et al.*, 2016). Estos son los obstáculos que limitan la realización de análisis a gran escala en el país. Hasta el momento no existen estudios, por ejemplo, en Malasia peninsular, que puedan verificar el estado del cambio de la cobertura terrestre de la palma de aceite durante un periodo que cubra aproximadamente las últimas dos décadas, ya que los datos son insuficientes y existen grandes diferencias en su calidad.

En la actualidad, el progreso en computación en la nube y los algoritmos de aprendizaje automático han mejorado tremendamente la capacidad de monitoreo ambiental de forma rápida, precisa y económica, manejando grandes escalas espaciales y temporales, utilizando la teledetección con big data. Las nuevas plataformas de computación basada en la nube y los sensores de satélite ofrecen oportuni-

dades para generar mapas de la cobertura del suelo diseñados para cumplir con los requisitos de aplicaciones específicas (Azzari & Lobell, 2017). Pero se reconoce que un manejo más efectivo de los problemas relacionados con la expansión y el monitoreo de la palma de aceite es una importante brecha de la investigación en curso para lograr los objetivos de sostenibilidad (Chong *et al.*, 2017). Parte de la iniciativa big data en teledetección es la disponibilidad de datos de acceso abierto de las misiones Landsat y Sentinel que brindan una cantidad importante de datos a escala temporal y espacial.

Convencionalmente, cubrir el área de Malasia peninsular requeriría un enorme número de imágenes Landsat que cubran varios años y adicional a ello se necesitaría el desarrollo de algoritmos para mitigar los problemas de la cobertura por nubes. Otros desafíos incluyen los requisitos de almacenamiento, la selección de clasificadores adecuados, el análisis de expertos y las potentes capacidades del *hardware*. Sin embargo, se pueden mitigar con las plataformas de mapeo basado en la nube que están disponibles actualmente, como las suministradas por Google Earth Engine (GEE) y el Remote Sensing Monitoring and Assessment Pipeline (REMAP). La computación en la nube puede proporcionar información a un amplio grupo de usuarios, en lugar de datos sin procesar para profesionales geoespaciales y en teledetección (Navulur, 2013). La Figura 4 muestra la infraestructura básica que integra la computación en la nube, *big data* y el aprendizaje automático.

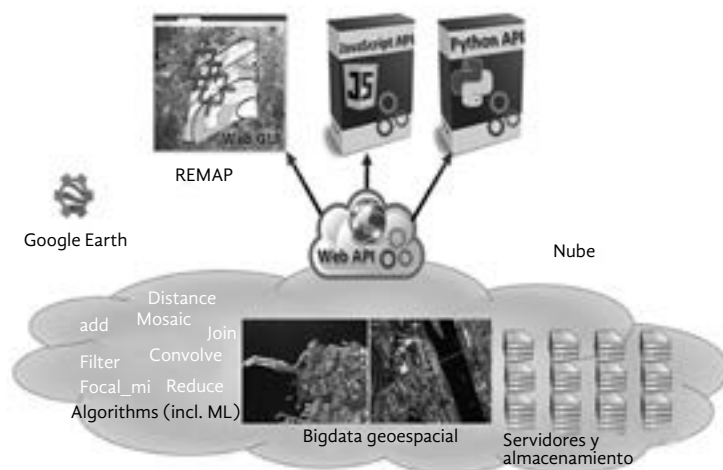


Figura 4. Ejemplo de integración de computación en la nube, *big data* y aprendizaje automático para la implementación de REMAP con tecnología de GEE.

Los avances de la computación en la nube y en los algoritmos de aprendizaje automático, están cambiando los métodos con los que se utilizan los datos de observación terrestre (OT) para el monitoreo ambiental, particularmente a medida que entramos en la era de los flujos de datos satelitales gratuitos y de acceso abierto (Hird *et al.*, 2017). Por ejemplo, el GEE puede ser empleado en línea y permite a los usuarios acceder a petabytes de conjuntos de datos de teledetección. Sin embargo, para hacer un uso efectivo, este debe ser operado a través del API, lo que requiere que el usuario sea capaz de programar utilizando JavaScript y de realizar un tratamiento en la nube. REMAP fue creado por científicos de la Universidad de Nueva Gales del Sur (UNSW, por su sigla en inglés) con tecnología de GEE. Permite hacer un análisis más rápido utilizando imágenes más 'limpias' y con menos contenido de nubes. Usa el almacenamiento de datos geoespaciales y la capacidad de análisis de datos de la plataforma de análisis basada en la nube de GEE, para permitir a los usuarios desarrollar, interactivamente, clasificaciones de aprendizaje automático de cobertura terrestre, dentro de un área de interés en cualquier parte del mundo de la que existan suficientes datos Landsat de archivo. Adicionalmente, la aplicación REMAP sirve para el monitoreo y el análisis de cambios en la cobertura terrestre, dejando a los usuarios mapear las distribuciones de ecosistemas en dos puntos en el tiempo (por ejemplo, en 2003 y en 2017), cuantificar el área de cambio en cada clase de mapa e informar la distribución estándar.

Uno de los algoritmos más utilizados para los servicios de mapeo basado en la nube es el de Bosques Aleatorios (RF, por su sigla en inglés), que ha demostrado tener un desempeño efectivo en aplicaciones de teledetección. El RF es un clasificador conjunto que produce múltiples árboles de decisión usando un conjunto aleatorio de muestras y variables de entrenamiento (Belgiu & Dragut, 2016). Lo adoptamos para realizar una evaluación rápida sobre la cobertura terrestre de Malasia peninsular. La Figura 5 muestra un ejemplo de los resultados producidos por REMAP. Su principal ventaja es la cantidad significativa de tiempo que se ahorra y la menor complejidad para producir el resultado en comparación con los métodos tradicionales.

El uso de REMAP permite la producción de un mapeo y evaluar los cambios de forma rápida. Sin embargo, se reconocen varias limitaciones, tales como la capacidad para elegir otros algoritmos de aprendizaje automático que podrían producir resultados diferentes. Adicionalmente, en la actualidad los datos están limitados solo a Landsat y a los años definidos por los desarrolladores, quienes han realizado procedimientos de preprocesamiento, tales como tratamiento de nubes, sin mucho control por parte de los usuarios. Según fue diseñada, es una herramienta fácil para que los usuarios con menos conocimiento técnico en teledetección puedan obtener resultados precisos y rápidos. Para un mapeo más detallado de las plantaciones de palma de aceite se puede utilizar un satélite de resolución muy alta, como WorldView-3 o Quickbird, para contar palmas de aceite y estimar su edad (Rizeei *et al.*, 2018), así como para evaluar las condiciones de salud (Santoso *et al.*, 2017) empleando técnicas de aprendizaje automático. Sin embargo, las condiciones nubosas de las zonas tropicales en las que se sembraron palmas de aceite, limitan la utilidad de los datos ópticos basados en satélite. Por lo tanto, es necesario realizar más trabajos de investigación sobre el uso de imágenes de radar para el mapeo de palma de aceite, debido a su capacidad para penetrar la neblina y las nubes.

Conclusiones

El AA es una parte de la IA y presentamos algunos ejemplos de aplicaciones para la teledetección de palma de aceite. En cierta medida estudios relacionados con la palma de aceite han aplicado métodos de IA usando datos de espectroscopias de campo o laboratorio, aeronaves piloteadas, VANT y satélites. Por ejemplo, los datos de espectroscopia de campo de las palmas de aceite objetivo han sido evaluados con RNA para determinar el nivel de gravedad de enfermedades. También se han utilizado datos multiespectrales e hiperespectrales aéreos, pero solo se emplearon métodos estándar de análisis espectral. El uso de datos de VANT para los estudios de la palma de aceite continúa en una etapa joven, en la que, por el momento, sirven para el conteo de palmas y para una evaluación general de la salud con métodos estándar de una imagen RGB. Se están desarrollando sistemas VANT más avanzados, basados en detección

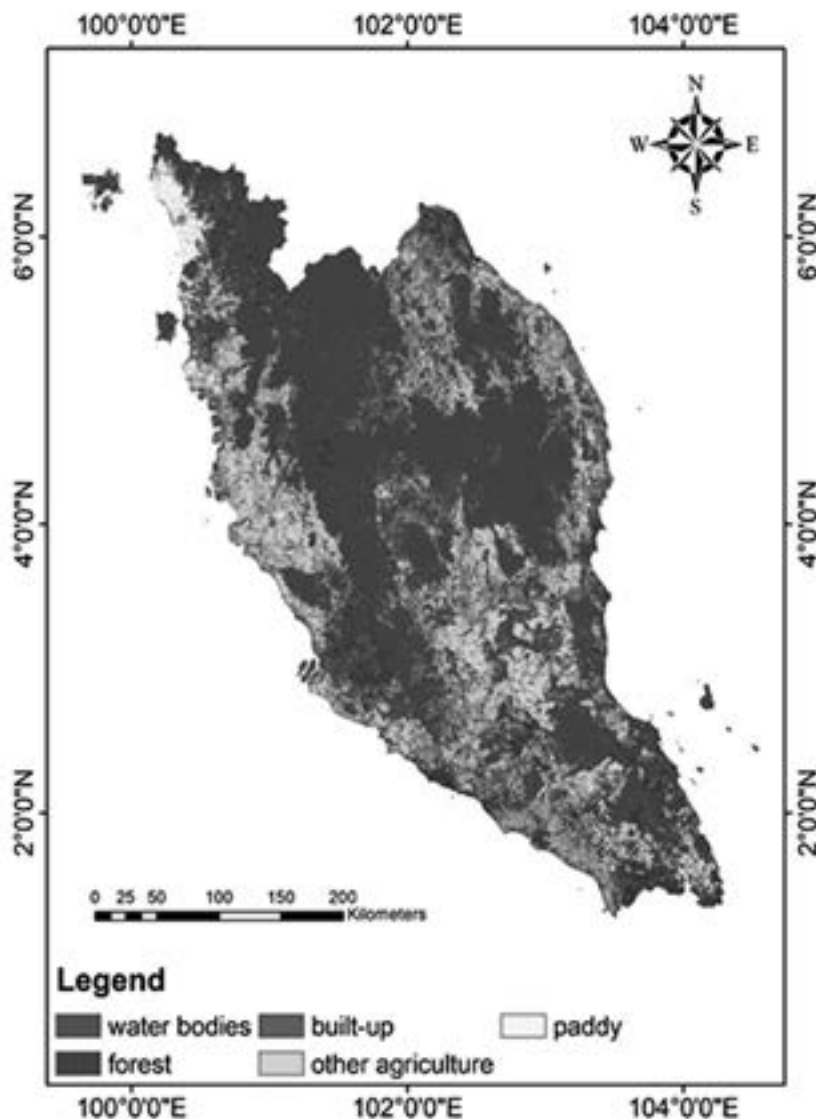


Figura 5. Cobertura terrestre de Malasia peninsular en 2017 representada mediante servicios de computación en la nube como REMAP.

multiespectral e hiperespectral, pero todavía se encuentran en una etapa temprana. Con datos hiperespectrales, se puede investigar aún más su potencial de uso para la detección de enfermedades y de salud, ya que los investigadores tendrán a su disposición datos con mayores resoluciones y dimensiones espectrales. Aunque han utilizado datos de satélite para el estudio de la palma de aceite, los que usan métodos de IA/AA son limitados. Con la disponibilidad de plataformas de mapeo basadas en la nube, como Google Earth Engine y REMAP, ahora se pueden aplicar las técnicas de AA con mayor facilidad para el mapeo a gran escala de las plantaciones con fines de monitoreo y manejo de la sostenibilidad. Para un mapeo más detallado se emplean datos ópticos con resolución muy alta.

Con la creciente disponibilidad de datos satelitales gratuitos y la variedad de sistemas activos y pasivos de teledetección, que están creando un gran fenómeno de datos geoespaciales, el uso de IA/AA, así como de la computación en la nube, es el camino a seguir para extraer más información de los datos de teledetección para su aplicación en la palma de aceite. Estos son cruciales para llevar el cultivo hacia el cumplimiento de los objetivos de la agricultura 4.0, a pesar del hecho de que su uso aún es limitado y que, por lo tanto, requiere mayor investigación. Todavía hay brechas evidentes en IA para el análisis de datos de teledetección relacionados con la palma de aceite, principalmente debido a la falta de experiencia y entendimiento de los métodos y plataformas de aprendizaje

automático. Otro obstáculo que debe superarse es la necesidad de mayores habilidades de programación, importantes para las generaciones actuales y futuras de científicos, con el fin de dominar la IA y todos los otros dominios tecnológicos avanzados relacionados (Ayer *et al.*, 2014). Además de los sistemas ópticos pasivos, también se requerirá investigación intensiva para probar la capacidad de los sistemas activos que sean capaces de operar más eficientemente en condiciones tropicales nubosas, tales como el radar y el lidar, para evaluar las condiciones de las palmas de aceite.

Para trabajos futuros, es necesario explorar los métodos de IA y AA con mayor profundidad, ya que estos aún deben aplicarse intensivamente a las aplicaciones de palma de aceite que utilizan datos de teledetección para traducirlos en mejores decisiones y acciones en campo. Por ejemplo, se pueden desarrollar algoritmos de aprendizaje profundo para una detección y clasificación más precisa y automatizada de la palma de aceite. En la actualidad, el uso de nuevos datos de sensores multispectrales e hiperspectrales con integración de AA en aplicaciones sigue siendo

investigado intensivamente y se espera que pronto se obtengan resultados más sólidos. Es preciso acelerar el desarrollo de infraestructuras más efectivas para el manejo de plantaciones de palma de aceite que utilicen la integración de los principios del IoT, computación en la nube, agricultura de precisión, sostenibilidad y sistemas de teledetección más avanzados, para garantizar que la agroindustria pueda seguir progresando en la era de la RI 4.0. No obstante, a pesar de la emoción del marco conceptual, las intenciones y el alcance alrededor de la agricultura 4.0, su implementación exitosa es el principal desafío en muchos países del mundo (Yahya, 2018).

Agradecimientos

A la Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite, Fedepalma, por la financiación de nuestra asistencia a la conferencia y por los comentarios de los revisores para mejorar el manuscrito. Se agradece a Digdat Sdn Bhd por la adquisición y el intercambio de los datos del sensor UAV MicaSense Red Edge.

Referencias

- Ayer, V. M., Miguez, S., & Toby, B. H. (2014). Why scientists should learn to program in Python. *Powder Diffraction*, 29(S2), S48-S64.
- Azzari, G., & Lobell, D. B. (2017). Landsat-based classification in the cloud: An opportunity for a paradigm shift in land cover monitoring. *Remote Sensing of Environment*, 202, 64-74.
- Belgiu, M., & Dragut, L. (2016). Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 114: 24-31.
- Chong, K. L., Kanniah, K. D., Pohl, C., & Tan, K. P. (2017). A review of remote sensing applications for oil palm studies. *Geo-spatial Information Science*, 20(2), 184-200.
- Endeavour Management Services. (2018). Smart communities. Accessed: <http://em.com.my/blog/2017/06/22/smart-communities/>
- Bahrom, E. (2018). *UAV Based RGB/NIR aerial imaging for the detection of Ganoderma disease in oil palm plantation*. University of Malaya Master Thesis.
- Fitzherbert, E. B., Struebig, M. J., Morel, A., Danielsen, F., Brühl, C. A., Donald, P. F., & Phalan, B. (2008). How will oil palm expansion affect biodiversity?. *Trends in Ecology & Evolution*, 23(10), 538-545.
- Golhani, K., Balasundram, S. K., Vadmalai, G., & Pradhan, B. (2018). A review of neural networks in plant disease using hyperspectral data. *Information Processing in Agriculture*, 5(3), 354-371.

- Hird, J. N., DeLancey, E. R., McDermid, G. J., & Kariyeva, J. (2017). Google Earth Engine, open-access satellite data, and machine learning in support of large-area probabilistic wetland mapping. *Remote Sensing*, 9(12), 1315.
- IBM. (2018). IBM Research Precision Agriculture – Overview. Accessed: <https://www.ibm.com/products/my/en/>
- Izzuddin, M. A., Idris, A. S., Nisfariza, N. M., & Ezzati, B. (2015). Spectral based analysis of airborne hyperspectral remote sensing image for detection of *Ganoderma* disease in oil palm. *Proceedings of International Conference on Biological and Environmental Science*, 13-20.
- Kalantar, B., Idrees, M. O., Mansor, S., & Halin, A. A. (2017). Smart counting – oil palm tree inventory with UAV. *Coordinates*, 17-22.
- Liaghat, S., Ehsani, R., Mansor, S., Shafri, H. Z. M., Meon, S., Sankaran, S., & Azam, S. H. M. N. (2014). Early detection of basal stem rot disease (*Ganoderma*) in oil palms based on hyperspectral reflectance data using pattern recognition algorithms. *International Journal of Remote Sensing*, 35(10), 3427-3439.
- Lee, J. S. H., Wich, S., Widayati, A., & Koh, L. P. (2016). Detecting industrial oil palm plantations on Landsat images with Google Earth Engine. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 4, 219-224.
- Ma, Y., Wu, H., Wang, L., Huang, B., Ranjan, R., Zomaya, A., & Jie, W. (2015). Remote sensing big data computing: Challenges and opportunities. *Future Generation Computer Systems* 51, 47-60.
- Navulur, K., Lester, D., Marchetti, A., & Hammann, G. (2013). *Demystifying Cloud Computing for Remote Sensing Applications*. Accessed: <http://ejournal.com/print/column/industry-insights/demystifying-cloud-computing-for-remote-sensing-applications>
- Rizeei, H. M., Shafri, H. Z. M., Mohamoud, M. A., Pradhan, B., & Kalantar, B. (2018). Oil palm counting and age estimation from WorldView-3 imagery and LiDAR data using an integrated OBIA height model and regression analysis. *Journal of Sensors*, 18, 1-13.
- Santoso, H., Tani, H., & Wang, X. (2017). Random Forest classification model of basal stem rot disease caused by *Ganoderma boninense* in oil palm plantations. *International Journal of Remote Sensing*, 38(16), 4683-4699.
- Sastrohartono, H., Suryotomo, A.P., Uktoro, A.I., & Renjani, R.A. (2016). Unmanned Aerial Vehicle Application for Plantation Mapping and Automatic Oil Palm Trees Counting on Oil Palm Plantation Management. *The 1st International Conference on the Role of Agricultural Engineering for Sustainable Agriculture Production*, 47-50
- Shafri, H. Z. M., Hamdan, N., & Anuar, M. I. (2012). Detection of stressed oil palms from an airborne sensor using optimized spectral indices. *International journal of remote sensing*, 33(14), 4293-4311.
- Yahya, N. (2018). *Agricultural 4.0: Its Implementation Toward Future Sustainability*. Green Urea 125-145. Singapore: Springer.

EcoProMIS, el sistema de información de gestión de producción ecológica*

EcoProMIS the Ecological Production Management Information System for Sustainable Palm Oil Production



KRAMER ROELOF

CEO Agricompas Limited, Reino Unido

CITACIÓN: Roelof, K. (2019). EcoProMIS, el sistema de información de gestión de producción ecológica. *Palmas*, 40 (Especial Tomo I), 194-203.

PALABRAS CLAVE: sistema de información, sostenibilidad, producción ecológica.

KEYWORDS: Information system, sustainability, ecological production.

*Artículo original recibido en inglés y traducido por Carlos Arenas París.

Resumen

EcoProMIS es una plataforma de análisis de datos que genera conocimientos sobre la producción de cultivos de forma gratuita, para asociaciones público-privadas de agricultores y federaciones con Agricompas. Se presta apoyo a las partes interesadas en el proceso de toma de decisiones comerciales para la cadena de la palma de aceite, como comercializadores, fabricantes de insumos, procesadores, entidades financieras y compañías de seguros. El sistema EcoProMIS para palma de aceite y arroz se desarrollará durante los próximos tres años con financiación del gobierno del Reino Unido e incluye asociados como el CIAT, Fedearroz, Cenipalma y Solidaridad (Colombia), además de Rothamsted, Pixalytics, Elastacloud y Agricompas (Reino Unido). El objetivo es optimizar la productividad y rentabilidad, y al mismo tiempo reducir el impacto ambiental, fomentar la biodiversidad y mejorar la situación socioeconómica de las partes interesadas.

Abstract

EcoProMIS is a data analytics platform that creates free crop production knowledge in public private partnerships with growers, federations and Agricompas. Commercial decision support in the oil palm value chain is provided to stakeholders like traders, input manufacturers, processors and insurance and finance firms. EcoProMIS for oil palm and rice will be developed during the next three years with funding from the UK government and includes partners CIAT, Fedearroz, Cenipalma and Solidaridad (Colombia) and Rothamsted, Pixalytics, Elastacloud and Agricompas (UK). The objective is to improve productivity and profitability while reducing environmental impact, promote biodiversity and improve socio-economic conditions of stakeholders.

La agricultura sostenible requiere equilibrio y detalle

La agricultura global se esfuerza por igualar la oferta y la demanda. Por un lado, la población mundial continúa creciendo, necesitando más alimento, combustible y fibra. Por el otro, el aumento en la producción es lento o incluso negativo. Los sistemas de cultivo se enfrentan cada vez más a problemas crónicos. Sequías, plagas y enfermedades, la contaminación del aire, el agua y la tierra, la deforestación, la reducción de la biodiversidad y la inequidad socioeconómica se han vuelto titulares familiares.

El planeta se está quedando sin nueva capacidad de producción, ya que los bosques han desaparecido y otras áreas son o se han vuelto no aptas para los cultivos debido a las condiciones ambientales o del suelo. Además de reducir la población mundial y aumentar nuestra eficiencia de consumo, la mejor opción es incrementar la productividad de las unidades de producción de alimento existentes: animales y campos de cultivo.

Teniendo en cuenta los desafíos actuales, es necesario equilibrar un aumento en la productividad con una mayor rentabilidad, un impacto ambiental minimizado, la promoción de la biodiversidad y mejores condiciones socioeconómicas:

- Los cultivadores no invertirán en métodos de producción que sean más respetuosos con el medioambiente cuando no estén asegurados o sus esfuerzos no sean compensados.

- Si se quiere mantener el planeta habitable, es necesario tener bajo control los gases de efecto invernadero, la contaminación y la reducción de la biodiversidad.
- La inequidad socioeconómica resulta en una educación pobre, disputas por la propiedad de la tierra y en una menor productividad.

Si bien se debe incrementar la productividad, en realidad no hay una solución que aplique para todos los casos. Las unidades de producción de cultivos, o campos, consisten en diferentes suelos y son administradas por distintos agricultores. Estos campos reciben diversas calidades y cantidades de insumos y están ubicados en climas diferentes, donde plagas y enfermedades hacen que la vida de los cultivadores sea aún más difícil.

Los sistemas de producción agrícola están llegando al máximo de su capacidad. Se requiere producir más y al mismo tiempo ser más sostenibles. Por lo tanto, es necesario crear soluciones equilibradas y detalladas que sean aplicables y efectivas por unidad de producción.

Agricompas crea plataformas de análisis de datos que proporcionan conocimiento y apoyo a la toma de decisiones: EcoProMIS

EcoProMIS significa *Ecological Production Management Information System* (Sistema de Información de Gestión de Producción Ecológica). Producción eco-

lógica es aquella que tiene en cuenta el impacto ambiental de sus procesos. Un sistema de manejo de la información es una herramienta para medir, monitorear y administrar los procesos de producción. EcoProMIS es una plataforma de análisis de datos creada por Agricompa y sus socios en Colombia para los cultivos de arroz, palma de aceite y cacao, con el objetivo de proporcionar conocimiento y apoyo a la toma de decisiones, así como ayudar a hacer la agricultura más sostenible. Las plataformas desarrolladas tienen las siguientes características:

- Los servicios son específicos a cultivos y países.
- Los cultivadores y las federaciones son socios que comparten datos y conocimientos.
- Los grupos de interés de los cultivos son clientes que se suscriben a servicios de apoyo a la toma de decisiones.
- Los servicios se prestan casi en tiempo real durante todo el ciclo de producción.
- El objetivo es la producción ecológica para la agricultura sostenible.

Datos de entrada: parámetros de producción del cultivo

La producción de cultivos de plantas agrupa una serie de procesos fisiológicos tales como germinación, desarrollo foliar y de las raíces, floración y fotosíntesis, que resulta en la producción de carbohidratos en forma de almidón, aceite o azúcar. La duración y calidad de estos procesos se define por el impacto combinado de los parámetros de producción del cultivo. Las condiciones favorables llevan a la germinación rápida y homogénea de la mayoría de semillas sembradas, y a un periodo corto para la creación de hojas y raíces bien desarrolladas, lo que resulta en un mayor periodo de fotosíntesis.

El suelo es la unidad de producción y define su capacidad potencial. El manejo es la habilidad y experiencia del cultivador para calcular los diferentes trabajos y aplicaciones en el campo, de la mejor manera posible. Los insumos se definen por la calidad del manejo, pero también por la disponibilidad y asequibilidad, resultando en variaciones a la cantidad y calidad que se aplica en el campo. El medioambiente incluye

el entorno biótico y abiótico; el primero es el resultado de plagas, enfermedades y malezas, y el segundo del clima (por ejemplo, precipitación, temperatura y energía solar).

Los cultivadores, las federaciones, Agricompa y terceros, de ser necesario, recolectan los parámetros de entrada en un esfuerzo conjunto:

- Los datos del suelo se obtienen a partir de muestras que proporcionan indicadores químicos, biológicos y físicos.
- Los insumos como el fertilizante, los químicos de protección de cultivos y las semillas se registran y describen al ser aplicados.
- El cultivador anota las actividades de manejo.
- El entorno abiótico es registrado por estaciones meteorológicas conectadas mediante internet o un proveedor de datos móviles que suministran conjuntos de datos en intervalos cortos.

Datos de salida: desempeño de cultivos, impacto ambiental, biodiversidad y condiciones socioeconómicas

El estado y progreso de los diferentes procesos de producción de cultivos es medido, de principio a fin, mediante la Observación Terrestre (OT) con satélite y/o VANT, dispositivos de mano, sensores *in situ* o métodos de muestreo. A esto, se le llama medición del desempeño del cultivo o “fenotipado” (Figura 1).

Los subproductos de la producción de cultivos son emisiones en el aire o absorción de químicos en el suelo y filtraciones al agua superficial y subterránea. Se miden los gases de efecto invernadero más importantes, CO₂ y CH₄, con sistemas de flujo Eddy Covariance de LICOR. Los óxidos nitrogenados se calculan con cámaras estáticas.

Las condiciones socioeconómicas se registran mediante entrevistas y cuestionarios diligenciados por los cultivadores para obtener otras informaciones, como la colección de datos de entrada. Incluyen: ingresos, educación, salud y seguridad. La instalación de trampas cámara sirve para detectar los movimientos de animales y recolectar indicadores de bio-

diversidad. Otros datos sobre la flora y la fauna son recolectados haciendo un inventario de las especies presentes y protegidas en o en las áreas cercanas a los cultivos de palma de aceite.

Creación de valor mediante el procesamiento de datos en conocimiento

Los datos de entrada recolectados son procesados casi que en tiempo real y se utilizan para alimentar los mo-

delos del cultivo. Estos simulan las principales etapas fisiológicas para ese cultivo específico. Como resultado, se tienen simulaciones, de principio a fin, de procesos como la germinación, desarrollo foliar y de las raíces y de la fotosíntesis que produce carbohidratos (Figura 2).

Los datos de salida de teledetección, tales como imágenes satelitales y de drones, se integran y relacionan con datos de muestras de suelo georreferenciadas con el fin de crear una imagen completa del desempeño del cultivo por campo, al mismo momento de la simulación basada en los datos de entrada.



Figura 1. Esquema de medición del desempeño del cultivo.

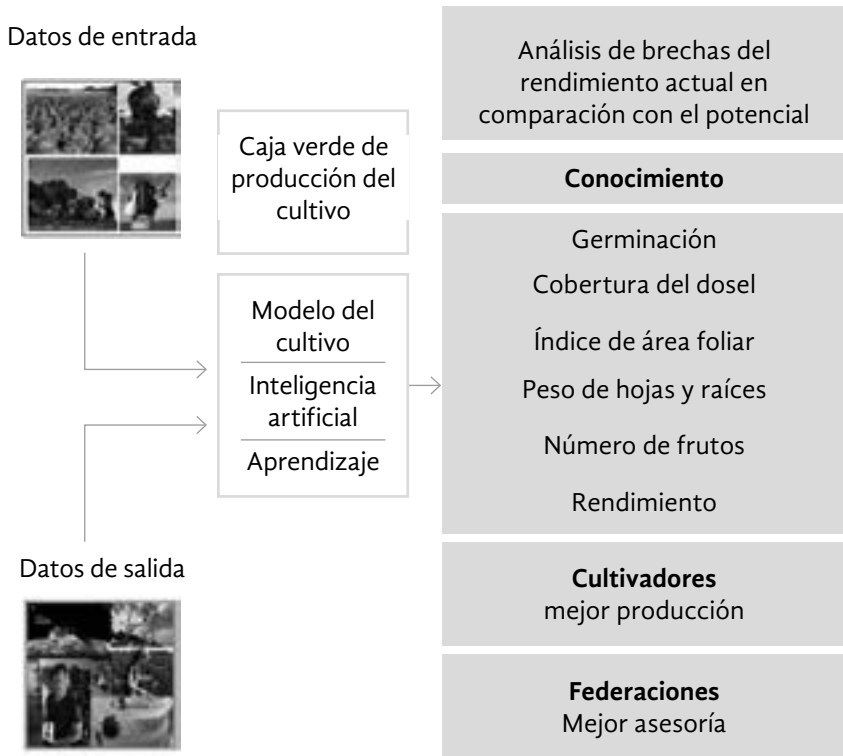


Figura 2. Se utilizan datos completos de cultivos para analizar las brechas en el rendimiento de la producción.

Utilizando los datos de entrada y salida, el modelo de cultivos, el aprendizaje automático y la inteligencia artificial, se pretende analizar la diferencia entre el desempeño actual y potencial del cultivo, casi que en tiempo real durante los diferentes procesos de producción. El análisis de las brechas debe permitir explicar cómo los parámetros únicos o combinados de producción de cultivos afectan la reducción del desempeño del mismo.

El conocimiento obtenido a partir del análisis de las brechas está disponible para los cultivadores, sus federaciones y los institutos de investigación participantes. Esto les ayuda a producir y realizar mejor investigación, y a prestar una mayor asistencia al cultivo. A cambio, Agricompas recibe los datos de “entrada” y “salida” necesarios, así como el apoyo para recolectar los datos de la agroindustria y el entendimiento específico regional o del cultivo. El conocimiento se proporciona a los agricultores mediante interfaces basadas en la red, tales como un teléfono inteligente, tabletas y computadores de escritorio. Los cultivadores con conocimiento del estado real del cultivo y un análisis del impacto de los parámetros del mismo, están en capacidad de tomar mejores decisiones y de realizar intervenciones acertadas más rápidamente. Las federaciones e institutos de investigación reciben conocimiento del cultivo y capacidad de computación para correr simulaciones que mejoren sus investigaciones y servicios de asesoría a los cultivadores.

El conocimiento no solo se suministra de arriba hacia abajo mediante el análisis de datos con los algoritmos de Agricompas, también puede ser compartido entre los agricultores que quieran comparar sus sistemas y técnicas de producción. El conocimiento de los cultivadores de abajo hacia arriba proporciona información valiosa a los institutos de investigación y a Agricompas.

Generación de ingresos mediante el procesamiento de conocimiento en apoyo a la toma de decisiones

Agricompas crea ocho módulos de apoyo a la toma de decisiones para sus clientes en toda la industria, incluyendo grandes cultivadores, fabricantes de insumos y equipos, comerciantes, procesadores y departamentos gubernamentales. El conocimiento de producción de cultivos específico para el campo, es combinado con los datos PESTLE obtenidos en la cadena de valor más amplia. Estos datos incluyen indicadores políticos, económicos, sociales, técnicos, jurídicos y ambientales. Pueden ser indicadores específicos para reducir los gases de efecto invernadero, promover la biodiversidad, proporcionar productos agrícolas seguros y mejorar las condiciones socioeconómicas y la posición competitiva de los cultivadores. El objetivo de los módulos de soporte a la toma de decisiones es acrecentar la eficiencia técnica, económica y ambiental de los procesos principales y auxiliares de la cadena de valor (Figura 3).

Figura 3. Agricompas crea soporte a la toma de decisiones, combinando datos de producción en campo con datos de la industria.

| Conocimiento | Datos de la industria | Soporte a la toma de decisiones |
|---|--|--|
| <p>Germinación</p> <p>Cobertura del dosel</p> <p>Índice de área foliar</p> <p>Peso de hojas y raíces</p> <p>Número de frutos</p> <p>Rendimiento</p> | <p>Políticos</p> <p>Económicos</p> <p>Sociales</p> <p>Técnicos</p> <p>Jurídicos</p> <p>Ambientales</p> | <p>1. Productividad</p> <p>2. Finanzas</p> <p>3. Seguros</p> <p>4. Cadena de suministro</p> <p>5. Seguridad alimentaria</p> <p>6. R&D</p> <p>7. Medioambiente</p> <p>8. Minería de datos</p> |

Los módulos de soporte a la toma de decisiones están disponibles en la cadena de valor más amplia mediante suscripciones. Las cuotas son anuales y los clientes reciben alertas e informes, así como acceso en línea para mejorar sus procesos relevantes.

Ocho módulos de soporte a la toma de decisiones

Agricompas diseñó ocho módulos de soporte a la toma de decisiones que se enfocan en desafíos de los sistemas de producción de cultivos en el mundo. Para cada módulo se proporciona una explicación y un ejemplo (Tabla 1).

Productividad

Este módulo está diseñado para mejorar los procesos del cultivo durante el ciclo de producción. El cultivador recibe asesoría para realizar intervenciones que mejoran el rendimiento de la producción o reducen el costo económico de la misma. Este servicio pago se presta en adición al conocimiento que ya se suministra al agricultor, a cambio de que este comparta sus datos. Agricompas genera un costo adicional para proporcionar este módulo de productividad, ya que tiene que asignar recursos extra a una solución personalizada, incluyendo una garantía de resultados. Algunos ejemplos de intervención incluyen: aplicación u optimización de fertilizantes, riego o químicos para proteger el cultivo, cuando los procesos son más

lentos de lo esperado. En caso de que la germinación sea insuficiente y quede tiempo para volver a sembrar o replantar, entonces el cultivador puede decidir terminar la producción y comenzar de nuevo. Los principales clientes son grandes agricultores que quieran optimizar la producción, fabricantes de insumos que deseen entender la eficiencia de sus productos o proveedores de servicios que proporcionen soluciones en forma de asesoría e insumos seleccionados.

Finanzas

Capitaliza el entendimiento de la ecuación riesgo-retorno de las unidades de producción. Los cultivadores pueden calcular el retorno de la inversión en bienes de capital, tales como equipos de cosecha o inversiones a largo plazo, como sistemas de riego. A los bancos y gobiernos les sirve utilizar este módulo para evaluar el riesgo y la necesidad de suministrar crédito al agricultor o pequeño productor, y para fijar una tasa de interés justificada. Los proveedores y distribuidores de insumos lo usan para evaluar el riesgo financiero al suministrar sobre una base de negociación y crédito. Los proveedores de equipos, lo emplean para compilar ofertas promocionales para los cultivadores con base en el VAN de las inversiones en equipo.

Seguros

Proporciona a las compañías de seguros más información por agricultor y unidad de producción. Se

Tabla 1. El objetivo de los módulos de soporte a la toma de decisiones es mejorar la eficiencia de los procesos de la cadena de valor.

| Módulo | Objetivo |
|--------------------------|--|
| 1. Productividad | Intervenciones durante el proceso de producción. |
| 2. Finanzas | Inversiones a largo plazo en personas y activos |
| 3. Seguros | Mejores precios de riesgos de producción y pérdida de rendimiento |
| 4. Cadena de suministro | Optimizar la cosecha, logística y procesamiento |
| 5. Seguridad alimentaria | Pronosticar la producción y los rendimientos |
| 6. R&D | Enfocar el mejoramiento de insumos y equipos |
| 7. Medioambiente | Reducir los GEI, promover la biodiversidad y mejorar las condiciones socioeconómicas |
| 8. Minería de datos | Perfeccionar el uso de datos (históricos) |

pueden analizar las brechas de rendimiento y asignar la causa de las pérdidas de rendimiento al suelo, al manejo, a los insumos y al medioambiente, o a una combinación de los cuatro parámetros de clasificación. Las aseguradoras pueden pagar más rápido y con mayor precisión por las pérdidas de rendimiento o ingresos que estén fuera del control del cultivador. Gracias a un mejor precio de riesgo, esperamos primas más bajas en promedio. Como resultado, más agricultores pueden asegurarse y, al hacer inversiones más justificadas en los sistemas de producción, la productividad aumenta. Por lo general, el requisito para obtener un préstamo es el aseguramiento del cultivo.

Cadena de suministro

Módulo diseñado para los cultivos de procesamiento como la remolacha azucarera, la caña de azúcar, la palma de aceite y la yuca. Estos cultivos deben procesarse rápidamente después de la cosecha para que no pierdan peso y/o calidad. Suelen ser voluminosos y procesados en pocas fábricas grandes y concentradas, ubicadas en un radio de 50 - 100 millas. Los principales objetivos de este módulo son la integración de la cosecha, la logística y el procesamiento.

Este módulo optimiza los tiempos de cosecha de múltiples unidades de producción. Utilizando el modelado de cultivos, el aprendizaje automático y la inteligencia artificial, se puede determinar el mejor momento para cosechar, dependiendo de la madurez de los frutos y/o del potencial de producción restante de un campo, en comparación con otras unidades de producción. El cronograma de cosecha puede reorganizarse dependiendo de los nutrientes restantes, el agua o la energía solar, o la aparición de enfermedades y plagas.

Al integrar la cosecha, la logística y el procesamiento, se optimizan varios procesos: las empresas de transporte pueden ser solicitadas o canceladas en un sistema en tiempo real; la cosecha se coordina dependiendo de la distancia a la fábrica y la disponibilidad de los equipos o el personal de cosecha; y la capacidad de procesamiento de la fábrica impulsa el volumen de cosecha, especialmente si no hay capacidad o posibilidad para almacenar el producto cosechado durante un tiempo más largo.

Seguridad alimentaria

Proporciona un indicio del rendimiento final en las primeras etapas del ciclo de producción. Esto da a los cultivadores un aviso sobre la calidad del proceso en curso, pero también les permite organizar la cosecha, la logística y la capacidad de almacenamiento. Los comerciantes utilizan el módulo para entender el pronóstico de producción para una región o un país entero y, dependiendo del equilibrio entre la oferta y la demanda, pueden calcular cuál será el excedente o la demanda para ciertas materias primas, y así fijar los precios y emitir órdenes de compra. Los gobiernos y las autoridades regionales, lo emplean para entender la situación de seguridad alimentaria y tomar medidas apropiadas, tales como políticas de importación o exportación. También para decidir comenzar un programa para estimular la productividad en zonas en las que haya un déficit crónico.

R&D

Diseñado para la industria manufacturera de insumos y equipos. Con base en nuestra capacidad para analizar las brechas de rendimiento en la producción y determinar el impacto de parámetros únicos o combinados del cultivo, se proporciona información más detallada sobre la eficacia de la genética o los químicos para la protección del cultivo, los procesos y el rendimiento final. Al realizar un análisis especial sobre la eficiencia de los insumos en múltiples campos, y filtrar los efectos del suelo, el manejo y el ambiente, se obtiene una herramienta poderosa para acelerar el desarrollo de productos y cuantificar el impacto.

Medioambiente

Este módulo de soporte a la toma de decisiones está diseñado para reducir el impacto ambiental, promover la biodiversidad y/o mejorar las condiciones socioeconómicas de los grupos de interés de la cadena de valor.

Los cultivadores, los departamentos gubernamentales y los agentes de la ley pueden utilizar este módulo para medir, monitorear y manejar las emisiones de gases de efecto invernadero o el impacto sobre la biodiversidad. Las intervenciones en el manejo de produc-

ción de cultivos, la aplicación de insumos y el entorno biótico desencadenan recompensas o sanciones para los agricultores en esquemas de políticas de gobierno. También se usa para diseñar nuevos métodos y herramientas para medir, monitorear y manejar el impacto ambiental: sensores en tierra, equipos de teledetección, etc. En este momento, el impacto ambiental y los indicadores de producción no están siendo relacionados en sistemas y esquemas asequibles y precisos.

Minería de datos

Actualmente, varios conjuntos de datos no se explotan en su verdadero potencial, porque no son procesados y analizados en conjunto con otros datos y/o aplicando algoritmos sofisticados. Con EcoProMIS, Agricompa presenta una plataforma de análisis de datos que crea, agrega y procesa grandes conjuntos de datos integrales en conocimiento y soporte a la toma de decisiones.

Modelo de negocios: acuerdos de usuario con socios y suscripciones con clientes

Acuerdos de usuario

Los socios cultivadores, sus federaciones e institutos de investigación / ONG seleccionados, firman acuerdos de usuario individuales con Agricompa con el fin de compartir datos y conocimientos. En estos se establecen los términos y condiciones entre el socio y Agricompa (Figura 4). Por un lado, el socio crea y comparte datos y conocimiento específico siguiendo protocolos definidos que son diseñados en nuestros pilotos y proyectos precomerciales.

Por su parte, Agricompa recolecta datos (por ejemplo, de estaciones meteorológicas y satélites), y los combina con los datos del socio para procesarlos con sus algoritmos y producir conocimiento valioso. Se ofrecen servicios de conocimiento de producción de cultivos de valor básico a los agricultores, a cambio de crear y compartir sus datos. Agricompa recibe el derecho a utilizar el conocimiento en el desarrollo y comercialización de módulos de soporte a la toma de decisiones comerciales. Además de tomar decisiones de una mejor manera y más rápidamente para mejorar la producción del cultivo, los agricultores también tienen la funcionalidad de compartir datos con otros cultivadores para compararse. La plataforma EcoProMIS proporciona información sobre el impacto de los parámetros de manejo, insumos, ambientales y del suelo, en los procesos de producción de cultivos casi que en tiempo real.

Las federaciones crean y comparten datos e información de la cadena de valor a cambio de la capacidad para manipular conjuntos de datos para el desarrollo de escenarios que llevan a consejos específicos para el cultivador. Se informa de fenómenos climáticos o brotes de enfermedades. La plataforma EcoProMIS les permite suministrar mejor información y sugerencias a sus cultivadores.

Los institutos de investigación (por ejemplo, CIAT), y ONG (por ejemplo, Solidaridad Network) pueden firmar acuerdos de usuario con el objetivo de proporcionar experiencia regional o de cultivos para mejorar los algoritmos de EcoProMIS o para el desarrollo de aplicaciones con los pequeños productores. A cambio, reciben acceso a las funcionalidades de la plataforma con el fin de probar los nuevos hallazgos en investigación (Institutos) en una plataforma EcoProMIS en el mundo real o recibir la funcionalidad

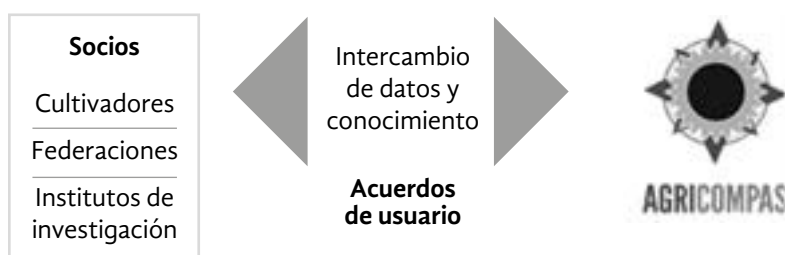


Figura 4. Acuerdos de usuario entre socios y Agricompa para compartir datos y conocimiento.

de la plataforma para mejorar sus servicios e intercambio de conocimientos con los pequeños productores (ONG).

Suscripciones

Agricompas ofrece soporte a la toma de decisiones comerciales para sus clientes por una cuota de suscripción anual (Figura 5). Los módulos de soporte a la toma de decisiones se personalizan según los requisitos del cliente y se calibran según las circunstancias locales.

EcoProMIS en Colombia

En Colombia, EcoProMIS tiene dos proyectos: el Programa de Sociedad Internacional 2 (IPP2) para el

mejoramiento de la producción de la palma de aceite y el arroz, y el Innovate UK para el cacao. El proyecto IPP2 para palma de aceite y arroz comenzó en febrero de 2018 y durará hasta abril de 2021. Durante 38 meses, ocho socios construirán una plataforma de análisis de datos, resultando en conocimiento y en servicios de soporte a la toma de decisiones (Tabla 2).

El objetivo del proyecto de Innovate UK es digitalizar la producción de cacao y apoyar a los pequeños productores y mujeres en áreas de posconflicto, para que mejoren su productividad y rentabilidad (Tabla 3). Además, se están preparando otros proyectos en Malasia, Sudáfrica, el Reino Unido y Ucrania.

El objetivo del proyecto de Innovate UK es digitalizar la producción de cacao y apoyar a los pequeños productores y mujeres en áreas de posconflicto, para

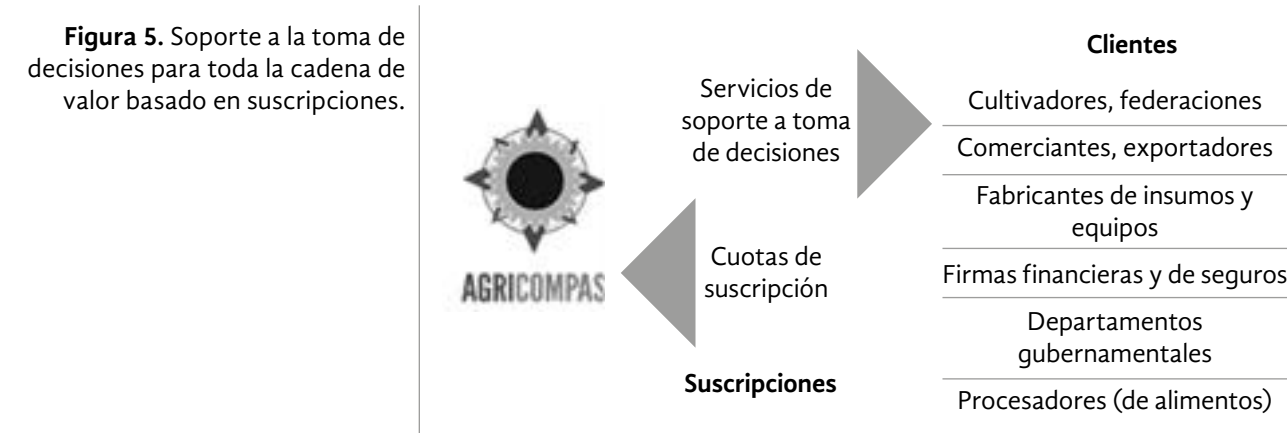


Tabla 1. EcoProMis para palma de aceite y arroz (proyecto IPP2).

| | |
|--|---|
| Objetivo: producción sostenible de arroz y palma de aceite. | Productos: plataforma de análisis de datos, conocimiento y soporte a la toma de decisiones. |
| Colaboradores en Colombia <ul style="list-style-type: none"> • CIAT (investigación de CGIAR) • Solidaridad (ONG) • Fedearroz (federación) • Cenipalma (federación) Colaboradores en el Reino Unido <ul style="list-style-type: none"> • Rothamsted (investigación) • Elastacloud (SME) • Pixalytics (SME) • Agricompas Ltda. | Proyecto: Programa de Sociedad Internacional (IPP2), administrado por la Agencia Espacial del Reino Unido Presupuesto: £4,5m (£4m financiados por el Departamento de Negocios, Energía y Estrategia Industrial, gobierno del Reino Unido) Duración: 38 meses, febrero de 2018 - abril de 2021. FTO: acuerdo de colaboración firmado: Proyecto IPR de la plataforma y derechos comerciales definidos y cedidos a Agricompas. |

que mejoren su productividad y rentabilidad (Tabla 3). Además, se están preparando otros proyectos en Malasia, Sudáfrica, el Reino Unido y Ucrania.

Impulso hasta la fecha y pasos a seguir

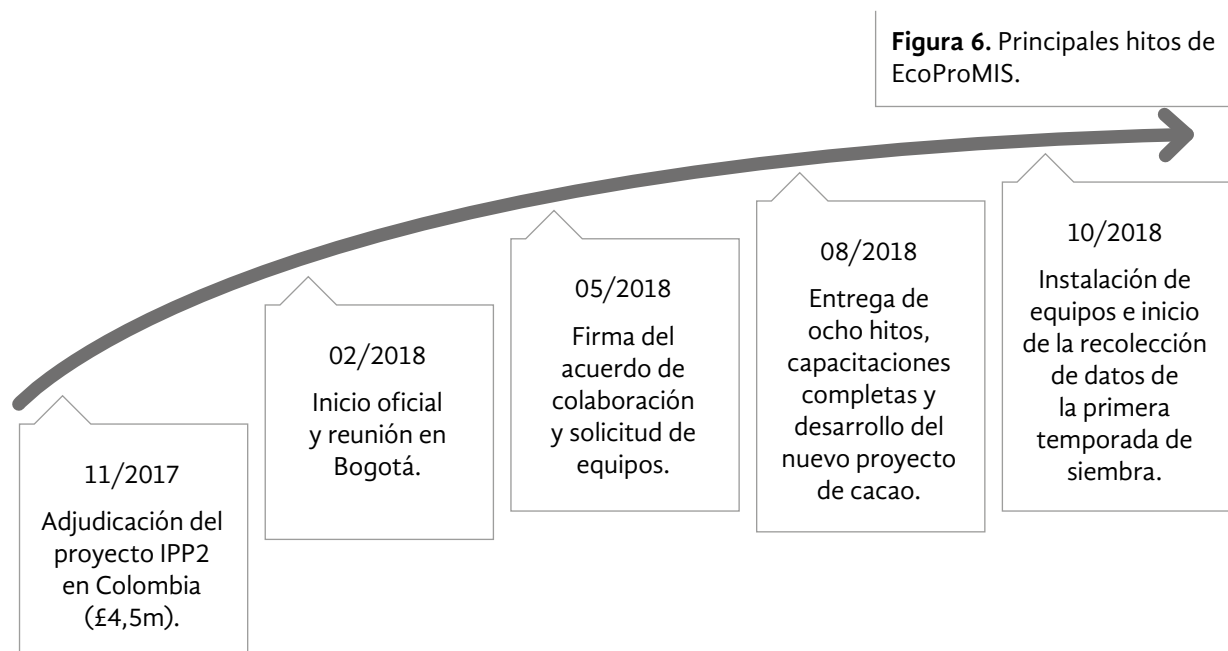
Agricompas fue fundada en noviembre de 2016 con el objetivo de desarrollar la plataforma EcoProMIS en regiones y cultivos seleccionados. Tomó un año de viajes, construcción de redes de contacto y preparación de propuestas del proyecto para ganar el proyecto IPP2 en Colombia para arroz y palma de aceite. El inició oficial fue en febrero de 2018. En mayo de

2018 se firmó el acuerdo de colaboración entre ocho partes. A finales de agosto de 2018, se entregaron los primeros siete hitos, incluyendo la adquisición de *hardware*, los protocolos de recolección de datos y la capacitación y talleres para la operación de drones, sistemas de flujo, estaciones meteorológicas e imágenes de satélite (Figura 6).

En septiembre de 2018 se adjudicó el proyecto de cacao de Innovative UK y, a octubre de 2018, la mayoría de los equipos estaban instalados en los campos, listos para comenzar a recolectar datos en noviembre de 2018. Agricompas continuará desarrollando y probando su sistema EcoProMIS en cultivos y regiones diferentes en todo el mundo.

Tabla 2. EcoProMis para cacao (proyecto de Innovate UK).

| | |
|--|---|
| Objetivo: producción sostenible de cacao. | Productos: plataforma de análisis de datos, conocimiento y soporte a la toma de decisiones. |
| Colaboradores en Colombia <ul style="list-style-type: none"> Fedecacao (federación) Solidaridad (ONG) Colaboradores en el Reino Unido <ul style="list-style-type: none"> University of Lincoln University of Reading Agricompas Ltda. | Proyecto: Agri-tech Catalyst Colombia, manejado por Innovate UK. Presupuesto: £470k (£410k financiado por Innovate UK) Duración: 18 meses, febrero de 2019 - julio de 2020. FTO: colaboración por ser acordada y firmada. |



Enfoques no invasivos para la evaluación y el monitoreo de enfermedades vegetales*

Non-Invasive Approaches for Oil Palm Disease Assessment and Monitoring



SIVA K. BALASUNDRAM

Departamento de Tecnología
Agropecuaria, Facultad de Agricultura,
Technology
Agricultural Department, Faculty of
Agriculture, Universiti Putra Malaysia

AUTORES: Siva K. Balasundram, Kamlesh Golhani, Redmond R. Shamshiri, Departamento de Tecnología Agropecuaria, Facultad de Agricultura, Universiti Putra Malaysia.

CITACIÓN: Balasundram, S K., Golhani, K., & Shamshiri, R. R. (2019). Enfoques no invasivos para la evaluación y el monitoreo de enfermedades vegetales. *Palmas*, 40 (Especial Tomo I), 204-219.

PALABRAS CLAVE: protección vegetal de precisión, detección temprana, espectroscopia sin imágenes, espectroscopia de imágenes, índice espectral de enfermedades.

KEYWORDS: Precision plant protection, early detection, spectroscopy without images, image spectroscopy, disease spectral index.

*Artículo original recibido en inglés y traducido por Carlos Arenas París.

Resumen

La evaluación de enfermedades vegetales se realiza para analizar las mediciones de enfermedades/ patógenos (fitopatometría), siendo fundamental para estimar la intensidad y las pérdidas de cultivos. Ayuda a los investigadores y agricultores a determinar la causa de la enfermedad y el grado del daño (físico y económico). Se requiere de un enfoque preciso y confiable para validar su identificación y estimar su gravedad. Las técnicas contemporáneas desarrolladas para la detección de enfermedades vegetales giran en torno al concepto de métodos de muestreo no destructivos. Estos pueden llevarse a cabo rápida y rigurosamente, sin afectar el crecimiento del cultivo. Se han estudiado varias técnicas espectroscópicas y de imagen para detectar los organismos dañinos que las causan. Las enfermedades que se evalúan, según sus síntomas visuales en el cultivo, son llamadas sintomáticas. Es importante analizar el tipo de daño, la causa del síntoma, el efecto y las maneras de prevenir una mayor propagación. Generalmente, se sabe que la mayoría de las enfermedades que atacan los cultivos tienen efectos adversos sobre el rendimiento. A continuación, se describe el uso de herramientas de la agricultura de precisión, tales como la espectroscopia de reflectancia y redes neuronales artificiales, para evaluar y monitorear enfermedades vegetales.

Introducción

Típicamente, las enfermedades vegetales atacan el aparato fotosintético y afectan el crecimiento de la planta (Lichtenthaler, 1996). La mayoría (aproximadamente el 85 %) son causadas por organismos fúngicos o similares a los hongos. Otras, por bacterias, virus y viroides, y unas pocas por ciertos nematodos (Isleib, 2012). Los microorganismos patógenos son de naturaleza ubicua. Caracterizan los síntomas y producen enfermedades debido a la susceptibilidad de la planta a sus impactos adversos. Gran parte de los patógenos desempeñan actividades esenciales en la naturaleza, obtienen nutrientes de su hospedador y se asocian con las plantas mediante relaciones simbióticas o no simbióticas. Las plantas sospechosas deben identificarse por sus síntomas foliares y en los frutos externos, antes de realizar investigaciones en el laboratorio. En la mayoría de los casos, estos síntomas visibles suelen manifestarse en las etapas media a tardía de la infección (Strange, 2005). No obstante, la identificación morfológica de las enfermedades no es confiable. Se requiere un método apropiado para detectar el agente causal.

Tradicionalmente, los hongos se reconocían morfológicamente, seguido de su aislamiento y cultivo. Por otra parte, se realizaban pruebas biológicas para detectar las bacterias, y los virus eran identificados con base en su material genético, ensayos de transmisión y su rango de hospedadores (Sharma y Sharma, 2016). Recientemente, los avances en la biotecnología y la biología molecular han revolucionado el campo de la detección de enfermedades vegetales. Se han desarrollado varias técnicas invasivas de diagnóstico, tales como el *Western blot*, el ensayo por inmunoadsorción ligado a enzimas (ELISA), la reacción en cadena de la polimerasa con transcriptasa inversa (RT-PCR, en inglés) y chips de ADN (Sharma y Sharma, 2016). Con estas técnicas de laboratorio es posible detectar una enfermedad vegetal tan pronto como aparecen los síntomas. Son conocidas también como destructivas o de marcador molecular, e implican el muestreo destructivo de hojas, seguido de un tratamiento químico.

Cada técnica tiene sus propias ventajas y limitaciones. Los investigadores prefieren adoptar las invasivas debido a su velocidad y precisión en la detección de enfermedades. Sin embargo, plantean inconsisten-

cia e insensibilidad debido a diferentes razones, como la interacción y la concentración hospedador-patógeno. Por ejemplo, el viroide cadang cocotero (Coco-nut cadang-cadang, cccvd) es un agente causal de la enfermedad de manchas color naranja en la palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.), que se puede detectar utilizando RT-PCR (Wu *et al.*, 2013; Vadamalai *et al.*, 2016), el ensayo de protección de ribonucleasas (RPA, por su sigla en inglés) (Vadamalai *et al.*, 2009), y amplificación isotérmica mediada por LOOP (LAMP, por su sigla en inglés) (Thanarajoo *et al.*, 2014). Un estudio reciente encontró que estas técnicas no eran ni consistentes ni sensibles, y que no lograban cuantificar las concentraciones del viroide (Thanarajoo, 2014). Así mismo, Sakudo *et al.* (2006) descubrieron que las técnicas invasivas (ELISA, RT-PCR y *Western blot*) eran efectivas para el diagnóstico de infecciones virales, pero ninguna de ellas era ideal en términos de rentabilidad, rapidez y precisión. Recientemente, Cui *et al.* (2018) revisaron las ventajas y desventajas de las técnicas invasivas y no invasivas.

Hay algunas más que también se usan con frecuencia, como por ejemplo la reacción en cadena de la polimerasa (PCR, por su sigla en inglés) y la hibridación fluorescente in situ (FISH, por su sigla en inglés). La PCR es fácil de operar y es portátil, pero ha sido sometida a extracción de ADN, inhibidores y actividad de la polimerasa (Eun *et al.*, 2002a; Eun *et al.*, 2002b). FISH es altamente sensible y permite la visualización, identificación, enumeración y conteo simultáneo de células microbiales individuales, pero la autofluorescencia del microorganismo es un obstáculo importante (Perera *et al.*, 2002).

En la última década se han desarrollado varias técnicas no invasivas, que son sensibles, consistentes, de alto rendimiento, rápidas y rentables. Su aplicación ha aumentado constantemente, siendo las más populares: espectroscopia de fluorescencia, espectroscopia visible/infrarrojo cercano (VNIR, por su sigla en inglés), imágenes de fluorescencia e imágenes hiperespectrales (Sankaran *et al.*, 2010).

Antecedentes

Las imágenes hiperespectrales son una técnica importante en la teledetección. Los sensores hiperes-

pectrales capturan datos desde el rango visible al infrarrojo cercano del espectro electromagnético, y adquieren información espectral de cientos de bandas estrechas (Ghamisi *et al.*, 2017). Es una de las técnicas más eficientes y de rápido desarrollo, con la que se puede extraer información precisa y detallada sobre un objeto (Ortenberg *et al.*, 2011). Por ejemplo, se han utilizado sensores hiperespectrales como una herramienta para la espectroscopia de campo en aplicaciones geológicas (Goetz *et al.*, 2009; Thompson *et al.*, 1999) y agrícolas (Liu *et al.*, 2018; Silva-Perez *et al.*, 2017). Las imágenes hiperespectrales han sido usadas en varias secuencias de la resolución de problemas, como en la detección, clasificación, discriminación, identificación y caracterización (Chang, 2007; Chang, 2003). Sus ventajas hacen que la precisión de la protección vegetal sea aún más alcanzable. Varios estudios recientes (Lu *et al.*, 2018; Whetton *et al.*, 2018a; Whetton *et al.*, 2018b; Heim *et al.*, 2018; Dhau, *et al.*, 2018; Kong *et al.*, 2018) han intentado explicar el papel de las bandas hiperespectrales en la distinción entre plantas sanas y enfermas. La literatura destaca una interpretación más completa y dinámica de los datos hiperespectrales, que puede llevar a una detección temprana de las enfermedades vegetales. Por ejemplo, Moghadam *et al.* (2017) describieron la importancia de las imágenes hiperespectrales de rango completo y las técnicas de aprendizaje automático, para diferenciar entre plantas de capsicum sanas e infectadas con el virus del bronceado del tomate (TSWV, por su sigla en inglés). Se utilizaron varios índices de vegetación (VI, por su sigla en inglés) y modelos probabilísticos basados en datos para entrenar los clasificadores para la detección de TSWV. Ahmadi *et al.* (2017) hallaron la enfermedad de la Pudrición basal del estípote por *Ganoderma* en la palma de aceite en sus etapas tempranas, a partir de datos espectroscópicos y de imágenes, utilizando una red neuronal artificial.

La mayoría de las veces, las firmas espectrales de una planta enferma no se pueden analizar correctamente usando enfoques paramétricos, tales como re-

La mayoría de las veces, las firmas espectrales de una planta enferma no se pueden analizar correctamente usando enfoques paramétricos, tales como regresión simple o múltiple y estadísticas funcionales.

gresión simple o múltiple y estadísticas funcionales. Por lo tanto, los enfoques no paramétricos, tales como el análisis de componentes principales (ACP), la lógica difusa, las máquinas de vectores de soporte (SVM, por su sigla en inglés), el análisis de grupos (CA), los mínimos cuadrados parciales (PLS, por su sigla en inglés), y las redes neuronales (RN), han sido utilizados en el área de la espectroscopia hiperespectral. Por ejemplo, la técnica del análisis discriminante lineal de Fisher (ADL) se utiliza para clasificar datos hiperespectrales con y sin imágenes de dos o más clases.

Básicamente, los datos hiperespectrales son de naturaleza multivariante. El ACP es un método estadístico multivariado que elimina la redundancia en los análisis univariados, y ayuda a identificar patrones de los datos espectrales. Básicamente, el ACP transforma grandes números de variables correlacionadas en números más pequeños de variables no correlacionadas, llamados componentes principales (CP) (Zhao *et al.*, 2011). El ACP y el PLS fueron utilizados recientemente para la detección de enfermedades fúngicas (moho amarillo y fusariosis de la espiga) en el trigo y la cebada (Whetton *et al.*, 2018a; Whetton *et al.*, 2018b). Whetton *et al.* (2018a) realizaron un ACP en cultivos de cereal infectados con moho amarillo y fusariosis de la espiga, en diferentes etapas del crecimiento, y estudiaron su patrón temporal y su autocorrelación serial. Los resultados sugirieron usar PLS para cada etapa con el fin de obtener una predicción precisa. En la segunda parte del estudio, Whetton *et al.* (2018b) utilizaron la regresión PLS con validación cruzada dejando uno afuera para ambas enfermedades. Los resultados mostraron que el modelo de regresión desarrollado para la fusariosis de la espiga y el moho amarillo en

el trigo puede aplicarse para predecir estas enfermedades en la cebada.

Recientemente, Lu *et al.* (2018) también realizaron un ACP para evaluar 57 VI diferentes y obtuvieron seis CP para detectar hojas de tomate infectadas con varias enfermedades en distintas etapas. Se empleó el método de k vecinos más cercanos para clasificar cada CP con coeficientes de peso que van de 1 a 30. Se logró la mayor precisión de clasificación (100 %) para las hojas de tomate sanas entre las sanas y enfermas que se probaron. Utilizando el concepto de la teoría de conjuntos difusos, Kole *et al.* (2014) propusieron operaciones de procesamiento digital de imágenes con k-medias para la detección de la enfermedad del moho vellosa en hojas de uva. En total, se procesaron 31 imágenes digitales de plantas enfermas y sanas. La precisión de detección fue del 87 %.

El CA es una de las técnicas más empleadas. Para organizar los datos hiperespectrales, el CA permite agrupar píxeles dentro de valores espectrales similares y en clústeres (Leeser *et al.*, 2002). Krezhova *et al.* (2015) aplicaron el CA y la prueba t de Student, para determinar la significancia estadística de la diferencia entre las medias de los valores de reflectancia de control y manzanos infectados. La SVM es una técnica popular de aprendizaje automático, apropiada para el análisis de datos espectrales de alta dimensión (Zou *et al.*, 2006). Nagasubramanian *et al.* (2017) usaron un algoritmo genético (AG) y un optimizador con SVM para la selección de bandas espectrales óptimas para la identificación temprana de la podredumbre carbonosa en la soya. El enfoque AG-SVM la reconoció dentro de los tres días siguientes a la inoculación, con una precisión de clasificación del 97 %.

Las técnicas de aprendizaje automático tienen grandes desventajas, son altamente dependientes de los patrones en las variables, así como de las características que se van a extraer.

Las técnicas de aprendizaje automático tienen dos grandes desventajas. Primero, son altamente dependientes de los patrones en las variables, así como de las características que se van a extraer. Segundo, es necesario entrenar los clasificadores muchas veces antes de utilizarlos en aplicaciones del mundo real (Zhang *et al.*, 2015).

Las RN son las herramientas más prometedoras para el análisis de datos hiperespectrales. Típicamente, su mecanismo está basado en el sistema nervioso humano. Son muy útiles para reconocer patrones, independientemente de cualquier regla de reconocimiento explícito (Bishop, 1995). Según Cui *et al.* (2018), las RN requieren menos estadística formal y son capaces de modelar relaciones no lineales complejas. Existe un interés creciente en la aplicación de RN, para lograr el objetivo mayor de la protección vegetal de precisión utilizando datos hiperespectrales. Esta protección ofrece un medio holístico para controlar las enfermedades vegetales con base en el concepto de variabilidad espaciotemporal. Anteriormente, las RN han sido utilizadas para la minería de datos, pero sus varias aplicaciones con datos hiperespectrales han demostrado ser prometedoras para la detección temprana de enfermedades. Tienen capacidades únicas, tales como aprendizaje, generalización e imaginación para facilitar un diagnóstico confiable. Su grado de capacidad de diagnóstico es mayor que el de otras técnicas de aprendizaje automático.

Hoy en día, uno de los principales problemas es procesar grandes volúmenes de datos de imágenes hiperespectrales de alta dimensión (Ettabaa y Salem, 2018). La reducción de la dimensionalidad de los datos es una aplicación importante y eficiente para el manejo de datos hiperespectrales. Se ha reportado que se puede lograr un alto grado de reducción de la dimensionalidad de los datos al conservar una buena precisión de clasificación en los datos hiperespectrales (Goetz *et al.*, 1985). Es bien sabido que estos datos contienen información espectral aparente e inherente, de manera que sus logros y capacidades deben ser deliberados utilizando RN.

Las RN respaldan la capacidad de discriminación más poderosa para las enfermedades vegetales, porque combinan los mejores conjuntos de entrenadores para una clasificación precisa. Marini *et al.* (2008) describieron un tipo particular de técnica de reconocimiento de patrones basada en RN, llamada modelado de clase. Sus herramientas más populares fueron desarrolladas con base en la red neuronal artificial de Kohonen (Marini *et al.*, 2005) y una red de avance de múltiples capas (Marini *et al.*, 2007).

Al Bashish *et al.* (2010) utilizaron una infraestructura basada en el procesamiento de imágenes para la detección de cinco enfermedades: tizón temprano, moho blanco, moho ceniciento, tizón tardío y pequeña blancura de hojas y tallos de arroz. Se utilizaron las k-medias para agrupar las imágenes de las hojas enfermas. Luego, estas imágenes son pasadas por un clasificador de RN. El resultado describe que la RN detectó las enfermedades foliares con una precisión del 93 %.

Zhu *et al.* (2017) investigaron el potencial de las imágenes hiperespectrales como una técnica no invasiva de detección rápida. Hallaron el virus del mosaico del tabaco (TMV, por su sigla en inglés) en poco tiempo, utilizando imágenes hiperespectrales junto con el método de selección variable y con clasificadores de aprendizaje automático. Las precisiones subieron hasta el 95 % para los modelos con redes neuronales de propagación inversa (BPNN, por su sigla en inglés), máquinas de aprendizaje extremo (ELM, por su sigla en inglés), máquinas de vectores de soporte de mínimos cuadrados (LS-SVM), y hasta el 80 % para modelos quimiométricos con fusión de datos. En un estudio similar, Zhu *et al.* (2016) probaron BPNN junto con SVM, ELM, LS-VM, análisis de discriminación de mínimos cuadrados parciales (PLS-DA), LDA y bosques aleatorios (RF, por su sigla en inglés) para procesar imágenes hiperespectrales para la detección presintomática y la clasificación de TMV en las hojas de tabaco.

Un nuevo enfoque, llamado nariz con inteligencia artificial (nariz electrónica) es una técnica rápida y no invasiva para diagnosticar enfermedades vegetales

Un nuevo enfoque, llamado nariz con inteligencia artificial (nariz electrónica) es una técnica rápida y no invasiva para diagnosticar enfermedades vegetales

(Cui *et al.*, 2018). Con esta se pueden aplicar otras como RF, AC, SVM y regresión lineal para el reconocimiento de patrones. A pesar del amplio rango de aplicaciones de las RN, incluyendo la reducción de dimensionalidad y clasificación de datos, garantizan información espectral no adulterada de alta calidad para el análisis de datos hiperespectrales.

Una proporción de diferentes longitudes de onda de espectros de enfermedad pura, llamada índice espectral de enfermedad (SDI, por su sigla en inglés), también requiere estos algoritmos específicos de aprendizaje automático, que podrían ayudar a simplificar y, posiblemente, agilizar la detección de enfermedades vegetales. Ashourloo *et al.* (2016) describieron que los SDI son muy efectivos para reducir la dimensionalidad. Además, aumentan la tasa de estimación de enfermedades. Sin embargo, hasta el momento solo se ha desarrollado un pequeño número de SDI a partir de datos de teledetección hiperespectral con y sin imágenes, y no han sido procesados utilizando RN.

Los objetivos de este artículo son: i) discutir la aplicabilidad de RN al análisis de datos hiperespectrales para la detección temprana de enfermedades, y ii) revisar los nuevos SDI que podrían utilizarse para detectar enfermedades vegetales utilizando clasificadores de RN.

Detección temprana de enfermedades

La detección temprana de enfermedades vegetales utilizando métodos no destructivos puede minimizar la intervención humana directa en la protección vegetal. El diagnóstico rápido y preciso en etapas tempranas

nas es esencial para el control efectivo de las mismas. En los últimos años ha sido posible detectar y diagnosticar enfermedades vegetales en etapas iniciales utilizando datos hiperespectrales, en conjunto con modelos de RN. Sin embargo, la exploración visual continúa siendo una manera de inspección temprana para buscar síntomas de enfermedades.

Para lograr una detección y diagnóstico temprano confiable de las enfermedades vegetales, es necesario introducir e incorporar nuevos enfoques (espectroscopia con y sin imágenes) a una escala de laboratorio para complementar las técnicas moleculares, serológicas y microbiológicas, como ELISA Y RT-PCR. Estas técnicas enfrentan los desafíos del consumo de recursos en términos de tiempo, costo y mano de obra calificada. Por otro lado, se debe mantener un entorno altamente controlado y libre de contaminación al interior del laboratorio. No obstante, aún existe una amplia brecha entre el diagnóstico destructivo y no destructivo. La literatura reciente sugiere la aplicación de RN (Pu, 2017) con datos hiperespectrales (Moghadam *et al.*, 2017) como una medida para cerrar esta brecha. En particular, un enfoque de RN-hiperespectral mejora los resultados de clasificación en el diagnóstico no destructivo de enfermedades vegetales.

Los diversos patógenos microbianos causan una amplia gama de enfermedades en las plantas, como el moteado, mosaico, anillos y necrosis sistémica causada por virus (Wood, 1998); manchas foliares, tizón, podredumbre, marchitamiento, transmisión bacteriana, canchales, agallas, crecimientos excesivos, motas y costras, ocasionadas por bacterias (Raid, 2011); y antracnosis, roya, podredumbre de raíces y marchitamiento, principalmente por hongos (Koike *et al.*, 2017). No obstante, a menudo algunas enfermedades no manifiestan sus síntomas, permanecen asintomáticas, como por ejemplo la de las manchas color naranja en la palma de aceite, causada por viroides (Vadamalai *et al.*, 2016).

Los sensores hiperespectrales miden la reflectancia de las plantas enfermas. Luego, estos datos son utilizados para diseñar un modelo de RN y producir un sistema de soporte a la toma de decisiones. Los modelos hiperespectrales basados en RN actúan significativamente en la detección temprana de enfermedades. El principio básico de este enfoque es el

modelado de los datos de reflectancia del cultivo, que se miden utilizando técnicas hiperespectrales con y/o sin imágenes. Luego, se extraen las características de longitud de onda óptima (bandas espectrales) y se procesan usando técnicas multivariadas o de RN. Los VI se desarrollan a partir de estas bandas espectrales, que son de gran ayuda para caracterizar el estado del cultivo. Sin embargo, mientras tanto, la RN puede utilizar bandas espectrales o VI para modelar los datos.

Detección temprana utilizando espectroscopia sin imágenes

Típicamente, los datos hiperespectrales consisten en un gran número (<100) de bandas espectrales estrechas y contiguas. Es necesario preprocesarlas para analizar y modelar datos espectrales. Thenkabail *et al.* (2002) mencionaron los beneficios de utilizar un enfoque generoso de procesamiento de datos, tal como la red neuronal artificial, para seleccionar las mejores bandas espectrales. Los algoritmos de RN han sido implementados con éxito para identificar variables atípicas y características espectrales. Adicionalmente, también son un método de reducción de dimensionalidad. Los datos hiperespectrales se pueden procesar mucho más rápido con la técnica de RN que con otras. Las RN transforman los datos hiperespectrales en una forma de datos muy razonable (Qi *et al.*, 2011). Estos datos ofrecen una capacidad elevada de diagnóstico para la detección temprana de enfermedades. Las bandas espectrales con una absorción alta son más sensibles a varios pigmentos foliares, incluyendo clorofila a, clorofila b, violaxantina, β -caroteno, neoxantina y carotenoides. La patogenicidad en las plantas afecta directamente las concentraciones bioquímicas.

Tradicionalmente, un método de química húmeda implica la extracción de la hoja con solventes orgánicos para estimar el contenido de clorofila utilizando cromatografía líquida de alta eficacia (HPLC, por su sigla en inglés). En estos días, la estimación de clorofila se realiza con métodos no destructivos, mediante el espectrorradiómetro sin imágenes y un medidor portátil del desarrollo de análisis de suelos y plantas (SPAD, por su sigla en inglés). Las técnicas no destructivas miden el contenido de clorofila en tiempo real, y proporcionan ahorros valiosos en costos, mano de obra y tiempo. No obstante, se requieren mayores

esfuerzos para estimar otros pigmentos de las plantas usando un espectrorradiómetro sin imágenes.

Durante la patogénesis, las toxinas o enzimas específicas de patógenos inducen los tejidos de las plantas e influyen en sus propiedades ópticas. Los cambios en el patrón de reflectancia, debido a la interacción planta-patógeno, pueden verse afectados por alteraciones en la estructura y en la composición química de la hoja (Mahlein, 2016). Los datos hiperespectrales pueden evaluarse con una RN entrenada y representativa (Hill *et al.*, 2010). Los VI también pueden categorizarse utilizando clasificadores de RN. Wu *et al.* (2008) detectaron *Botrytis cinerea* en hojas de berenjena con un enfoque de RN-hiperespectral. Aplicaron clasificadores de RN y ACP a firmas hiperespectrales e identificaron con precisión pequeños síntomas de moho gris. En otro estudio, Le Maire *et al.* (2008) estudiaron VI derivados del borde rojo con RN.

Investigaciones recientes han demostrado el gran valor de usarla espectroscopia VNIR para la detección temprana de enfermedades en varias aplicaciones. Pydipati *et al.* (2006) encontraron que una BPNN de múltiples capas tiene las mayores capacidades de corrección y discriminación de longitud de onda de reflectancia, siendo entre 460 nm y 1130 nm, en incrementos de 10 nm. Así mismo, Miller *et al.* (1998) utilizaron una BPNN de múltiples capas con un algoritmo de reconocimiento de patrones para clasificar manchas superficiales en múltiples variedades de manzano.

Los datos hiperespectrales sin imágenes son los más interesantes y desafiantes. La medición espectral en tiempo real utilizando un espectrorradiómetro de campo produce una gran cantidad de datos, que requieren de preprocesamiento espectral. En este proceso se reducen muchas bandas espectrales; por lo tanto, la selección de bandas de onda óptimas es muy importante (Bulanon *et al.*, 2013). Se observa que el procesamiento espectral con el algoritmo de RN ha aumentado la accesibilidad de datos sin imagen en la detección de enfermedades. La aplicación de BPNN (Pydipati *et al.*, 2006; Miller *et al.*, 1998) para diferenciar entre los espectros de plantas sanas y enfermas, se ha convertido en una de las redes más eficientes y de más rápido desarrollo en la protección vegetal de precisión.

Detección temprana utilizando espectroscopia con imágenes

En los últimos años, y dado que las imágenes de teledetección se volvieron más fáciles de archivar, se han realizado varios estudios sobre el procesamiento de imágenes hiperespectrales. Igualmente, se han desarrollado técnicas de RN altamente flexibles para investigar las características espectrales de los cultivos. Sin embargo, el uso de sistema innovadores de imágenes espectrales para la detección temprana de enfermedades y la evaluación de la gravedad de enfermedades continúa en etapa de investigación (Bajwa *et al.*, 2004; Delalieux *et al.*, 2007).

A nuestro conocimiento, hasta el momento no se han evaluado clasificadores con RN puramente no paramétricas para la detección temprana de enfermedades, utilizando imágenes hiperespectrales. Se han desplegado espectrorradiómetros hiperespectrales de imágenes espaciales, tales como el sistema Eagle de espectrómetro de imágenes aéreas para aplicaciones (AISA), AVIRIS Hyperion, el espectrómetro de imagen con sistema de imágenes ópticas reflectivas (ROSIS) y el espectrómetro de imágenes de mapeo hiperespectral (HyMap), para detectar enfermedades sin aplicaciones de RN.

Las RN son apropiadas para la clasificación de imágenes hiperespectrales. Estas generan un clasificador usando insumos de entrenamiento. Básicamente, las RN son empleadas para extraer características de imágenes como insumos de entrenamiento, y sus clasificadores mejoran la precisión de la clasificación y reducen los efectos generales del ruido en las imágenes.

Las RN ofrecen un rango dinámico de algoritmos para el análisis de imágenes hiperespectrales. En su mayoría, se utiliza uno bidimensional para detectar enfermedades a partir de las características de estas imágenes. Los algoritmos básicos sirven para la reducción de datos, la extracción de características, la segmentación, el reconocimiento de objetos y la optimización de imágenes. Los avanzados, para la abstracción a nivel de píxel, característica, estructura y conjunto de objetos, y para la caracterización de la escena (Egmont-Petersen *et al.*, 2002; Gautam y Panigrahi, 2003; Min *et al.*, 2012).

Tabla 1. Uso de sensor hiperespectral para detectar y diagnosticar enfermedades de cultivos en etapas tempranas.

| Sensor | Cultivo | Enfermedad | Referencias |
|---|---------------------|--|--------------------------------|
| Espectrorradiómetros de campo ASD (350-2500 nm) | Arroz | Infecciones fúngicas | Liu <i>et al.</i> (2010) |
| | Arroz | Mancha parda del arroz | Liu <i>et al.</i> (2008) |
| | Berenjena | Moho gris | Wu <i>et al.</i> (2008) |
| GER-2600 (400-2500 nm) | Tomate | Tizón tardío | Wang <i>et al.</i> (2008) |
| ImSpector V10E (400-1000 nm) | Trigo | Roya amarilla | Moshou <i>et al.</i> (2004) |
| | Semilla oleaginosa | Infecciones fúngicas | Baraowski <i>et al.</i> (2015) |
| AISA | Cítricos | <i>Greening</i> (Huanglongbing) | Lee & Ehsani (2015) |
| | Palma de aceite | <i>Ganoderma</i> Pudrición basal del estípide | Shafri & Hamdan (2009) |
| Imágenes hiperespectrales (HIS) | Remolacha azucarera | Manchas foliares, moho polvoriento y roja de la hoja | Mahlein <i>et al.</i> (2012) |
| Hyperion | Remolacha azucarera | Roya anaranjada | Apan <i>et al.</i> (2004) |
| Escáner hiperespectral de imágenes | Trigo | <i>Fusarium</i> del trigo | Baurieguel & Herppich (2014) |
| Sistema portátil de imágenes hiperespectrales | Cítricos | Cancro cítrico | Oin <i>et al.</i> (2009) |
| | Maíz | Infecciones fúngicas | Del Fiore <i>et al.</i> (2010) |
| Hiperespectrómetro (350-1050 nm) | Trigo | Moho polvoriento | Shen <i>et al.</i> (2015) |

Las RN superan significativamente las limitaciones del análisis de datos hiperespectrales. Las imágenes hiperespectrales contienen información de alta dimensión en cubos de datos multidimensionales. La red neuronal convolucional (RNC) es un nuevo concepto, que ha demostrado ser muy efectivo para clasificar imágenes hiperespectrales de alta dimensión. Está compuesta de un conjunto de bloques que pueden aplicarse tanto en el espacio como en el tiempo (Paoletti *et al.* 2017). Paoletti *et al.* (2017) desarrollaron una nueva arquitectura profunda de RNC en 3-D para la clasificación espacial-espectral de imágenes hiperespectrales. Requiere, para una mejor clasificación de los resultados, una consideración conjunta de la información espectral junto con la espacial.

Mutanga y Skidmore (2004) integraron características espectrales en todo el rango espectral (400-2500 nm) de datos HyMap con una RN. Vale la pena mencionar que las imágenes hiperespectrales AVIRIS son útiles para caracterizar y estimar varias enfermedades fúngicas y bacterianas (Muhammed, 2005; Jones *et al.*,

2010). Por lo tanto, se recomienda el uso de RN para el análisis de datos AVIRIS, especialmente para enfermedades vegetales. La Tabla 1 resume algunos estudios importantes sobre el uso de datos hiperespectrales para la detección temprana de enfermedades.

Desafíos de las RN

El principal desafío de las RN en el procesamiento de datos hiperespectrales es el entrenamiento de una gran cantidad de insumos espectrales y la definición de sus objetivos. Esto se vuelve incluso más difícil con la aplicación de clasificadores de RN para la clasificación de VI y SDI. En general, el efecto Hughes, o la “maldición de la dimensión”, es el problema más complejo para los datos hiperespectrales, que trata con la diversidad y distorsiones en bandas espectrales. El efecto Hughes puede afectar el modelado de RN. Por lo general, esto sucede cuando la proporción del número de píxeles de entrenamiento o el de bandas espectrales está por encima del valor mínimo para lograr el ajuste estadístico

(Camps-Valls y Bruzzone, 2005). En particular, uno de los aspectos más desafiantes es el uso de clasificadores de RN para el análisis de mezclas espectrales (SMA, por su sigla en inglés), que es un buen modelo lineal. Se requieren RN no lineales para entrenar un gran conjunto de datos de espectros de enfermedades vegetales. Adicionalmente, las RN suelen ser consideradas como una caja negra, dado que no contienen información a priori, lo que es complejo en sí.

Por lo general, los clasificadores de RN catalogan diferentes enfermedades vegetales con base en la combinación de parámetros óptimos como textura, color y forma en la imagen de una cámara común (Ghaiwat y Arora, 2014). Los parámetros óptimos pueden entrenarse con facilidad, dado que las imágenes normales son separables linealmente. Por otro lado, la imagen hiperespectral es diferente a la de una cámara común. Los datos hiperespectrales no pueden entrenarse linealmente mientras contengan más de

cien bandas espectrales contiguas. Las arquitecturas de perceptrón multicapa, normalmente tratan con tales características no lineales. Adicionalmente, las bandas espectrales adyacentes en diferentes regiones espectrales son muy redundantes al extraer información para una RN. Las bandas espectrales se encuentran altamente interconectadas entre sí.

Índice espectral de enfermedad (SDI)

La mayoría de VI comunes fueron calculados a partir de longitudes de onda roja y del infrarrojo cercano (NIR, por su sigla en inglés). El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, por su sigla en inglés) (Rouse *et al.*, 1973) es uno de los VI más populares y usados para monitorear la salud de la vegetación. Balasundram *et al.* (2013) lo utilizaron para la evaluación preliminar de la enfermedad de la Marchitez roja en

Tabla 2. SDI bien establecidos para la detección temprana de enfermedades utilizando datos hiperespectrales.

| Sensor | SDI | Fórmulas | Referencias |
|--------------------------------------|--|---|--------------------------------|
| Hyperion | Índice de estrés hídrico enfermedad 1 (DSWI-1) | $R800/R1660$ | Apan <i>et al.</i> (2004) |
| | DSWI-2 | $R1660/R550$ | |
| | DSWI-3 | $R1660/R680$ | |
| | DSWI-4 | $R550/R680$ | |
| | DSWI-5 | $(R800+R550)/(R1660+R680)$ | |
| ASD Field Spec (Espectrorradiómetro) | Índice de salud (HI, en inglés) | $\frac{R534 - R698}{R534 + R698} - \frac{1}{2} \cdot R704$ | Mahlein <i>et al.</i> (2013) |
| | Índice de manchas foliares Cercospora (CLSI, en inglés) | $\frac{R698 - R570}{R570 + R513} - R734$ | |
| | Índice de Roya en remolacha azucarera (SBRI, en inglés) | $\frac{R520 - R513}{R570 + R513} - \frac{1}{2} \cdot R704$ | |
| | Índice de moho polvoriento (PMI, en inglés) | $\frac{R520 - R584}{R520 + R584} - R724$ | |
| | Índice de gravedad de la enfermedad de la roya foliar (LRDSI_1, en inglés) | $6.9 \frac{p605}{p455} - 1.2$ | Ashourloo <i>et al.</i> (2014) |
| | índice de gravedad de la enfermedad de la roya Foliar 2 (LRDSI_2, en inglés) | $4.2 \frac{p695}{p455} - 0.38$ | |
| | Índice normalizado saludable de la roya foliar (NLRHI) | $\frac{DS - \left(\frac{p675}{p755}\right)}{DS + \left(\frac{p675}{p775}\right)}$ | Ashourloo <i>et al.</i> (2016) |

la piña (*Ananas comosus*). Demostraron e infirieron que el NDVI es un método confiable para predecir la gravedad de la enfermedad. No obstante, no se ha demostrado que el NDVI sea adecuado para identificar el agente causal de las enfermedades vegetales. Peñuelas *et al.* (1994) encontraron que no sigue bandas de onda específicas que representen los cambios fisiológicos causados por los patógenos. Por lo tanto, es necesario extraer las características espectrales sensibles a la enfermedad para desarrollar un SDI. Por lo general, este es una proporción de las diferentes bandas espectrales sensibles a la enfermedad que se extraen con base en las respuestas espectrales de la vegetación enferma.

La detección temprana de una enfermedad con base en la teledetección hiperespectral es más precisa y significativa. Es así como se están desarrollando nuevos SDI utilizando datos hiperespectrales. Varios valores de SDI representan especificidad, sensibilidad y gravedad de la vegetación en las diferentes etapas de la infección. Se han usado para proporcionar un entendimiento único, científico y detallado de la patogénesis. En contraste con los VI comunes, los SDI tienen el potencial de discriminar y diferenciar una enfermedad vegetal de otra. Aunque cada una puede afectar el espectro de reflectancia foliar de una forma específica (Mahlein *et al.* 2013).

Es importante desarrollar índices específicos a una enfermedad con base en la progresión de sus síntomas. Ashourloo *et al.* (2014) generaron dos SDI utilizando datos hiperespectrales con base en el avance de la enfermedad para la detección de la roya de la hoja de trigo. Mediante estudios comparativos, Rumpf (2012) mostró que los SDI son superiores a los VI comunes para la identificación temprana de enfermedades. Los SDI desarrollados a partir de un espectrorradiómetro de imágenes pueden correlacionarse con los de espectrorradiómetros de campo sin imágenes. La capacidad de generalización de los SDI mejora mediante la correlación y validación cruzada. Por lo general, los espectrorradiómetros de campo sin imágenes calculan los SDI en un tiempo muy corto. En comparación, los de imágenes tardan más tiempo en seleccionar miembros finales sensibles (píxeles) de las imágenes hiperespectrales. Los datos hiperespectrales pueden detectar enfermedades a diferentes escalas, en una planta individual o hasta en campos enteros. La Tabla 2 resume los

diferentes SDI aplicados para la detección temprana de enfermedades utilizando datos hiperespectrales.

Tendencias hacia el futuro: aprendizaje profundo de datos hiperespectrales

El aprendizaje profundo es una técnica avanzada para el análisis de big data. Un modelo de este contiene muchas capas (generalmente, más de tres). Las neuronas de cada capa se encuentran conectadas intensamente con las características de los datos, permitiendo la obtención de información más compleja. Los modelos de aprendizaje profundo pueden aprender características de los datos de entrada a partir de una red de neuronas organizada jerárquicamente (Lowe *et al.*, 2017). Existe literatura reciente (Sladojevic *et al.*, 2016; Gomez-Chova *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2017) sobre la evaluación de estos modelos que utilizan el aprendizaje profundo y el análisis de imagen e imágenes hiperespectrales para la detección de enfermedades vegetales.

Se cree que el aprendizaje profundo es el futuro de la teledetección hiperespectral. La RNC es su modelo más popular que funciona en un dominio de imagen. Puede ser utilizada para la creación de imágenes hiperespectrales con el fin de detectar y clasificar enfermedades vegetales en un inicio temprano. Actualmente, la visión multimedia (Gomez-Chova *et al.*, 2015) y de computadora, y el procesamiento de lenguaje natural (Ghamisi *et al.*, 2017) son las áreas más prometedoras de aplicación del aprendizaje profundo (Sladojevic *et al.*, 2016).

Las arquitecturas de computación en la nube identificadas en la literatura reciente (Haut, *et al.*, 2017; Quirita *et al.*, 2017), fueron revisadas junto con el alcance futuro del enfoque hiperespectral de RN. Haut *et al.* (2017) exploraron por primera vez la posibilidad de utilizar una plataforma distribuida para agrupar un gran volumen de imágenes hiperespectrales, con base en las arquitecturas de computación en la nube. Quirita *et al.* (2017) propusieron una arquitectura, llamada *InterCloud Data Mining Architecture*, para los entornos de computación en la nube. Esta permite a los usuarios asignar poder de procesamiento y espacio de almacenamiento para administrar conjuntos de datos muy grandes, tales como las imágenes hiperespectrales.

Referencias

- Ahmadi, P., Muharam, F. M., Ahmad, K., Mansor, S., & Abu-Seman, I. (2017). Early detection of *Ganoderma* basal stem rot of oil palms using artificial neural network spectral analysis. *Plant Disease*, 101(6), 1009-1016.
- Al Bashish, D., Braik, M., & Bani-Ahmad, S. (2010). A framework for detection and classification of plant leaf and stem diseases. In: International Conference on Signal and Image Processing IEEE. Chennai, India.
- Apan, A., Held, A., Phinn, S., & Markley, J. (2004). Detecting sugarcane "orange rust" disease using EO-1 hyperion hyperspectral imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 25(2), 489-498.
- Ashourloo, D., Mobasheri, M., & Huete, A. (2014). Developing two spectral disease indices for detection of wheat leaf rust. *Remote Sensing of Environment*, 6(6), 4723-4740.
- Ashourloo, D., Matkan, A.A., Huete, A., Aghighi, H., and Mobasheri, M.R. (2016). Developing an index for detection and identification of disease stages. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 13(6):851-855.
- Bajwa, S. G., Bajcsy, P., Groves, P., & Tian, L. F. (2004). Hyperspectral image data mining for band selection in agricultural applications. *ASAE*, 47(3), 895-907.
- Balasundram, S. K., Kassim, F. A., Vadamalai, G., & Hanif, A. H. M. (2013) Estimation of red tip disease severity in pineapple using a non-contact sensor approach. *Journal of Agriculture Science*, 4(4), 206-208.
- Baranowski, P., Jedryczka, M., Mazurek, W., Babula-Skowronska, D., Siedliska, A., & Kaczmarek, J. (2015). Hyperspectral and thermal imaging of oilseed rape (*Brassica napus*) response to fungal species of the genus *alternaria*. *PLoS One*, 10(3), e0122913.
- Bauriegel, E., & Herppich, W. (2014). Hyperspectral and chlorophyll fluorescence imaging for early detection of plant diseases, with special reference to *fusarium* sp. infections on wheat. *Agriculture*, 4(1), 32-57.
- Bishop, C. M. (1995). *Neural networks for pattern recognition*. USA: Oxford University Press.
- Bulanon, D. M., Burks, T. F., Kim, D. G., & Ritenour, M. A. (2013). Citrus black spot detection using hyperspectral image analysis. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 15(3), 171-180.
- Camps-Valls, G., & Bruzzone, L. (2005). Kernel-based methods for hyperspectral image classification. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(6), 1351-1362.
- Chang, C. I. (2007). *Hyperspectral data exploitation: Theory and applications*. John Wiley & Sons.
- Chang, C. I. (2003). *Hyperspectral imaging: Techniques for spectral detection and classification*. New York: Kluwer Academic Publishers.
- Cui, S., Ling, P., Zhu, H., & Keener, H. (2018). Plant pest detection using an artificial nose system: A review. *Sensors*, 18(2), 378.
- Delalieux, S., Aardt, J., Keulemans, W., Schrevens, E., & Coppin, P. (2007). Detection of biotic stress (*Venturia inaequalis*) in apple trees using hyperspectral data: Non-parametric statistical approaches and physiological implications. *European Journal of Agronomy*, 27(1), 130-43.
- Del Fiore, A., Reverberi, M., Ricelli, A., Pinzari, F., Serranti, S., Fabbri, A.A., et al. (2010). Early detection of toxigenic fungi on maize by hyperspectral imaging analysis. *International Journal of Food Microbiology*, 144(1), 64-71.

- Dhau, I., Adam, E., Mutanga, O., & Ayisi, K. K. (2018). Detecting the severity of maize streak virus infestations in maize crop using in situ hyperspectral data. *Transactions of the Royal Society of South Africa*, 73, 8-15.
- Egmont-Petersen, M., De Ridder, D., & Handels, H. (2002). Image processing with neural networks - A review. *Pattern Recognition*, 35(10), 2279-2301.
- Ettabaa, K. S., & Salem, M. B. (2018). Adaptive progressive band selection for dimensionality reduction in hyperspectral images. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 46(2), 157-167.
- Eun, A. J. C., Huang, L., Chew, F. T., Fong-Yau, S., & Wong, S. M. (2002a). Detection of two orchid viruses using quartz crystal microbalance-based DNA biosensors. *Phytopathology*, 92(6), 654-658.
- Eun, A. J. C., Huang, L., Chew, F. T., Li, S. F. Y., & Wong, S. M. (2002b). Detection of two orchid viruses using quartz crystal microbalance (QCM) immunosensors. *Journal of Virological Methods*, 99(1-2), 71-79.
- Gautam, R. K., & Panigrahi, S. (2003). Image processing techniques and neural network models for predicting plant nitrate using aerial images. In: *International Joint Conference on Neural Networks IEEE*. Portland, OR, USA.
- Ghaiwat, S. N., & Arora, P. (2014). Detection and classification of plant leaf diseases using image processing techniques: A review. *International Journal of Recent Advances in Engineering and Technology*, 2, 2347-2812.
- Ghamisi, P., Plaza, J., Chen, Y., Li, J., & Plaza, A. J. (2017). Advanced spectral classifiers for hyperspectral images: A review. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 5(1), 8-32.
- Goetz, A. F. H., Vane, G., Solomon, J. E., & Rock, B. N. (1985). Imaging spectrometry for earth remote sensing. *Science*, 228(4704), 1147-1153.
- Goetz, A. F. H., Curtiss, B., & Shiley, D. A. (2009). Rapid gangue mineral concentration measurement over conveyors by NIR reflectance spectroscopy. *Minerals Engineering* 22(5), 490-499.
- Gomez-Chova, L., Tuia, D., Moser, G., & Camps-Valls, G. (2015). Multimodal classification of remote sensing images: a review and future directions. *Proceedings of the IEEE*, 103(9), 1560-15084.
- Haut, J. M., Paoletti, M., Plaza, J., & Plaza, A. (2017). Cloud implementation of the K-means algorithm for hyperspectral image analysis. *Journal of Supercomputing*, 73(1), 514-529.
- Heim, R. H. J., Wright, I. J., Chang, H. C., Carnegie, A. J., Pegg, G. S., Lancaster, E. K., *et al.* (2018). Detecting myrtle rust on lemon myrtle trees using spectral signatures and machine learning. *Plant Pathology* 67, 1114-1121.
- Hill, J., Udelhoven, T., Vohland, M., & Stevens, A. (2010). The use of laboratory spectroscopy and optical remote sensing for estimating soil properties. In: Oerke, E. C., Gerhards, R., Menz, G., Sikora, R.A. (Ed.). *Precision crop protection - The challenge and use of heterogeneity*. Dordrecht: Springer Netherlands.
- Isleib, J. (2012). *Signs and symptoms of plant disease: Is it fungal, viral or bacterial?* Detroit: Michigan State University Extension.
- Jones, C. D., Jones, J. B., & Lee, W. S. (2010). Diagnosis of bacterial spot of tomato using spectral signatures. *Computers and Electronics in Agriculture*, 74(2), 329-35.
- Koike, S. T., Gladders, P., & Paulus, A. O. (2017). *Causes of disease*. In: *Vegetable diseases: a color handbook*. London: Manson Publishing Limited.
- Kole, D. K., Ghosh, A., & Mitra, S. (2014). Detection of downy mildew disease present in the grape leaves based on fuzzy set theory. In: Kundu, M. K., Mohapatra, D. P., Konar, A., Chakraborty, A. (Ed.). *Advanced computing, Networking and Informatics 1*. Switzerland: Springer, 377-384.

- Kong, W., Zhang, C., Huang, W., Liu, F., & He, Y. (2018). Application of hyperspectral imaging to detect *Sclerotinia sclerotiorum* on oilseed rape stems. *Sensors*, 18(1), 123.
- Krezhova, D., Stoev, A., & Maneva, S. (2015). Detection of biotic stress caused by apple stem grooving virus in apple trees using hyperspectral reflectance analysis. *Comptes Rendus l'Académie Bulgare des Sciences*, 68(2), 175-182.
- Lee, W. S., & Ehsani, R. (2015). Sensing systems for precision agriculture in Florida. *Computers and Electronics in Agriculture*, 112, 2-9.
- Leeser, M. E., Belanovic, P., Estlick, M., Gokhale, M., Szymanski, J. J., & Theiler, J. P. (2002). Applying reconfigurable hardware to the analysis of multispectral and hyperspectral imagery. In: *Proceeding 4480, Imaging Spectrometry VII*, 100-108.
- Le Maire, G., Francois, C., Soudani, K., Berveiller, D., Pontailier, J. Y., Bréda, N., et al. (2008). Calibration and validation of hyperspectral indices for the estimation of broadleaved forest leaf chlorophyll content, leaf mass per area, leaf area index and leaf canopy biomass. *Remote Sensing of Environment*, 112, 3846-3864.
- Lichtenthaler, H. K. (1996). Vegetation stress: An introduction to the stress concept in plants. *Journal of Plant Physiol.*, 148(1-2), 4-14.
- Liu, J., Dong, Z., & Chen, X. (2018). Study on hyperspectral estimation model of total nitrogen content in soil of shaanxi province. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 108(4), 42025.
- Liu, Z., Huang, J., Tao, R., & Zhang, H. (2008). Estimating the severity of rice brown spot disease based on principal component analysis and radial basis function neural network. *Spectrosc Spectr Anal*, 28(9), 2156-2160.
- Liu, Z. Y., Wu, H. F., & Huang, J. F. (2010). Application of neural networks to discriminate fungal infection levels in rice panicles using hyperspectral reflectance and principal components analysis. *Computers and Electronics in Agriculture*, 72(2), 99-106.
- Lowe, A., Harrison, N., & French, A. P. (2017). Hyperspectral image analysis techniques for the detection and classification of the early onset of plant disease and stress. *Plant Methods*, 13(1), 80.
- Lu, J., Ehsani, R., Shi, Y., De Castro A. I., & Wang, S. (2018). Detection of multi-tomato leaf diseases (late blight, target and bacterial spots) in different stages by using a spectral-based sensor. *Science Reports*, 8, 2793.
- Mahlein, A. K. (2016). Plant disease detection by imaging sensors - parallels and specific demands for precision agriculture and plant phenotyping. *Plant Disease*, 100(2), 241-251.
- Mahlein, A. K., Steiner, U., Hillnhütter, C., Dehne, H. W., & Oerke, E. C. (2012). Hyperspectral imaging for small-scale analysis of symptoms caused by different sugar beet diseases. *Plant Methods*, 8(1), 3.
- Mahlein, A. K., Rumpf, T., Welke, P., Dehne, H. W., Plümer, L., Steiner, U., et al. (2013). Development of spectral indices for detecting and identifying plant diseases. *Remote Sensing of Environment*, 128, 21-30.
- Marini, F., Bucci, R., Magrì, A. L., & Magrì, A. D. (2008). Artificial neural networks in chemometrics: History, examples and perspectives. *Microchemical Journal*, 88(2), 178-185.
- Marini, F., Zupan, J., & Magrì, A. L. (2005). Class-modeling using kohonen artificial neural networks. *Analytica Chimica Acta*, 544(1-2), 306-314.
- Marini, F., Magrì, A. L., & Bucci, R. (2007). Multilayer feed-forward artificial neural networks for class modeling. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 88(1), 118-124.

- Miller, W. M., Throop, J. A., & Upchurch, B. L. (1998). Pattern recognition models for spectral reflectance evaluation of apple blemishes. *Postharvest Biology Technology*, 14(1), 11-20.
- Min, H., Lei, C., & Hua, M. (2012). *Classification of aerial photograph using neural network*. In: *International Conference on Systems, Man and Cybernetics IEEE*. Yasmine Hammamet, Tunisia.
- Moghadam, P., Ward, D., Goan, E., Jayawardena, S., Sikka, P., & Hernández, E. (2017). Plant disease detection using hyperspectral imaging. In: *International Conference on Digital Image Computing: Techniques and Applications IEEE*. Sydney, NSW, Australia, 1-8.
- Mutanga, O., & Skidmore, A. K. (2004). Narrow band vegetation indices overcome the saturation problem in biomass estimation. *International Journal of Remote Sensing*, 25(19), 3999-40014.
- Muhammed, H. H. (2005). Hyperspectral crop reflectance data for characterising and estimating fungal disease severity in wheat. *Biosystems Engineering*, 91(1), 9-20.
- Moshou, D., Bravo, C., West, J., Wahlen, S., McCartney, A., & Ramon, H. (2004). Automatic detection of "yellow rust" in wheat using reflectance measurements and neural networks. *Computers and Electronics in Agriculture*, 44(3), 173-188.
- Nagasubramanian, K., Jones, S., Sarkar, S., Singh, A. K., Singh, A., & Ganapathysubramanian, B. (2017). Hyperspectral band selection using genetic algorithm and support vector machines for early identification of charcoal rot disease in soybean. *Plant Methods*, 14, 1-20.
- Ortenberg, F., Thenkabail, P. S., Lyon, J. G., & Huete, A. (2011). Hyperspectral sensor characteristics: Airborne, spaceborne, hand-held, and truck-mounted; Integration of hyperspectral data with Lidar. In: Thenkabail, P. S., Lyon, J. G., Huete, A. (Ed.). *Hyperspectral remote sensing of vegetation*. USA: CRC Press, 39-67.
- Paoletti, M. E., Haut, J. M., Plaza, J., & Plaza, A. (2017). A new deep convolutional neural network for fast hyperspectral image classification. *ISPRS Journal and Photogrammetry and Remote Sensing*.
- Peñuelas, J., Gamon, J. A., Fredeen, A. L., Merino, J., & Field, C. B. (1994) Reflectance indices associated with physiological changes in nitrogen- and water-limited sunflower leaves. *Remote Sensing of Environment*, 48(2), 135-146.
- Perera, R. M. M., Marriott, P. J., & Galbally, I. E. (2002). Headspace solid-phase microextraction-Comprehensive two-dimensional gas chromatography of wound induced plant volatile organic compound emissions. *Analyst*, 127(12), 1601-1607.
- Pu, R. (2017). *Hyperspectral remote sensing: Fundamentals and practices*. USA: CRC Press.
- Pydipati, R., Burks, T. F., & Lee, W. S. (2006). Identification of citrus disease using color texture features and discriminant analysis. *Computers and Electronics in Agriculture* 52(1-2), 49-59.
- Qi, J., Inoue, Y., & Wiangwang, N. (2011). Hyperspectral remote sensing in global change studies. In: Thenkabail, P. S., Lyon, J. G., Huete, A. (Ed.). *Hyperspectral remote sensing of vegetation*. USA: CRC Press.
- Qin, J., Burks, T. F., Ritenour, M. A., & Bonn, W.G. (2009). Detection of citrus canker using hyperspectral reflectance imaging with spectral information divergence. *Journal of Food Engineering*, 93(2), 183-191.
- Quirita, V. A. A., Da Costa, G. A. O. P., Happ, P. N., Feitosa R. Q., Ferreira, R. Q., Oliveira, D. A. B., et al. (2017). A new cloud computing architecture for the classification of remote sensing data. *IEEE Journal of Select Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 10(2), 409-416.
- Raid, R. (2011). *Specific symptoms & signs of bacterial diseases. Plant pathology guidelines for master gardeners*. University of Florida.

- Rouse, J. W., Haas, R. H., Deering, D. W., & Harlan, J. C. (1973). *Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation*. NASA Scientific and Technical Information Program.
- Rumpf, T. (2012). *Finding spectral features for the early identification of biotic stress in plants*. Doctoral thesis. Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.
- Sakudo, A., Suganuma, Y., Kobayashi, T., Onodera, T., & Ikuta, K. (2006). Near-infrared spectroscopy: Promising diagnostic tool for viral infections. *Biochemical & Biophysical Research Communications*, 341(2), 279-284.
- Sankaran, S., Mishra, A., Ehsani, R., & Davis, C. A. (2010). Review of advanced techniques for detecting plant diseases. *Computers Electronics in Agriculture*, 72(1), 1-13.
- Shafri, H. Z. M., & Hamdan, N. (2009). Hyperspectral imagery for mapping disease infection in oil palm plantation using vegetation indices and red edge techniques. *American Journal of Applied Sciences*, 6(6), 1031-1035.
- Sharma, P., & Sharma, S. (2016). Paradigm shift in plant disease diagnostics: a journey from conventional diagnostics to nano-diagnostics. In: Kumar, P., Gupta, K. V., Tiwari, K. A., Kamle, M. (Ed). *Current trends in plant disease diagnostics and management practices*. Switzerland: Springer International Publishing AG, 237-264.
- Shen, W., Li, Y., Feng, W., Zhang, H., Zhang, Y., Xie, Y., et al. (2015). Inversion model for severity of powdery mildew in wheat leaves based on factor analysis-BP neural network. *Chinese Society of Agriculture Engineering*, 31(22), 183-90.
- Sladojevic, S., Arsenovic, M., Anderla, A., Culibrk, D., & Stefanovic, D. (2016). Deep neural networks-based recognition of plant diseases by leaf image classification. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2016, 1-11.
- Silva-Perez, V., Molero, G., Serbin, S. P. Condon, A. G., Reynolds, M. P., Furbank, R. T., & Evans, J. (2017). Hyperspectral reflectance as a tool to measure biochemical and physiological traits in wheat. *Journal of Experimental Botany*, 69(3), 483-496.
- Strange, R. N., & Scott, P. R. (2005). Plant disease: A threat to global food security. *Annual Review Phytopathology*, 43(1), 83-116.
- Thanarajoo, S. S., Kong, L. L., Kadir, J., Lau, W. H., & Vadamalai, G. (2014). Detection of Coconut cadang-cadang viroid (CCCVd) in oil palm by reverse transcription loop-mediated isothermal amplification (RT-LAMP). *Journal of Virological Methods*, 202, 19-23.
- Thanarajoo, S. S. (2014). *Rapid detection, accumulation and translocation of Coconut cadang-cadang viroid variants in oil palm*. Doctoral thesis. Universiti Putra Malaysia, Serdang.
- Thenkabail, P. S., Smith, R. B., & De Pauw, E. (2002). Evaluation of narrowband and broadband vegetation indices for determining optimal hyperspectral wavebands for agricultural crop characterization. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 68(6), 607-622.
- Thompson, A. J. B, Hauff, P. L., & Robitaille, A. J. (1999). Alteration mapping in exploration: application of short-wave infrared (SWIR) spectroscopy. *Society of Economic Geologist News*, 39, 16-27.
- Vadamalai, G., Hanold, D., Rezaian, M. A., & Randles, J. W. (2016). Variants of Coconut cadang-cadang viroid isolated from an African oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) in Malaysia. *Archives of Virology*, 151(7), 1447-1456.
- Vadamalai, G., Perera, A., Hanold, D., Rezaian, M. A., & Randles, J. W. (2009) Detection of Coconut cadang-cadang viroid sequences in oil and coconut palm by ribonuclease protection assay. *Annals of Applied Biology*, 154(10), 117-125.

- Wang, G., Sun, Y., & Wang, J. (2017). Automatic image-based plant disease severity estimation using deep learning. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2917536, 1-8.
- Wang, X., Zhang, M., Zhu, J., & Geng, S. (2008). Spectral prediction of *Phytophthora infestans* infection on tomatoes using artificial neural network (ANN). *International Journal of Remote Sensing*, 29(6), 1693-1706.
- Whetton, R. L., Hassall, K. L., Waine, T. W., & Mouazen, A. M. (2018a). Hyperspectral measurements of yellow rust and fusarium head blight in cereal crops: Part 1: Laboratory study. *Biosystems Engineering*, 166, 101-115.
- Whetton, R. L., Waine, T. W., & Mouazen, A. M. (2018b). Hyperspectral measurements of yellow rust and fusarium head blight in cereal crops: Part 2: On-line field measurement. *Biosystems Engineering*, 167, 144-158.
- Wood, K. R. (1998). Nepovirus isolation and RNA extraction. In: Foster, G. D., Taylor, S. C. (Ed.). *Plant virology protocols*. USA: Humana Press.
- Wu, D., Feng, L., Zhang, C., & He, Y. (2008). Early detection of *Botrytis cinerea* on eggplant leaves based on visible and near-infrared spectroscopy. *Transaction of the ASABE*, 51, 1133-1139.
- Wu, Y. H., Cheong, L. C., Meon, S., Lau, W. H., Kong, L. L., Joseph, H., & Vadamalai, G. (2013). Characterization of Coconut cadang-cadang viroid variants from oil palm affected by orange spotting disease in Malaysia. *Archives of Virology*, 158(6), 1407-1410.
- Zhao, Y., Chen, P., Lin, L., Harnly, J. M., Yu, L., & Li, Z. (2011). Tentative identification, quantitation, and principal component analysis of green pu-erh, green, and white teas using UPLC/DAD/MS. *Food Chemistry*, 126(3), 1269-1277.
- Zhu, H., Chu, B., Zhang, C., Liu, F., Jiang, L., & He, Y. (2017). Hyperspectral imaging for presymptomatic detection of tobacco disease with successive projections algorithm and machine-learning Classifiers. *Scientific Reports*, 7(1), 4125.
- Zhu, H., Cen, H., Zhang, C., & He, Y. (2016). Early detection and classification of tobacco leaves inoculated with tobacco mosaic virus based on hyperspectral imaging technique. In: ASABE Annual International Meeting.
- Zhang, B., Huang, W., Wang, C., Gong, L., Zhao, C., Liu, C., & Huang, D. (2015). Computer vision recognition of stem and calyx in apples using near-infrared linear-array structured light and 3D reconstruction. *Biosystem Engineering*, 139, 25-34.
- Zou, T., Dou, Y., Mi, H., Zou, J., & Ren, Y. (2006). Support vector regression for determination of component of compound oxytetracycline powder on near-infrared spectroscopy. *Analytical Biochemistry*, 355, 1-7.

Una década de investigación en teledetección de la enfermedad *Ganoderma* en Malasia*

A Decade of Research on *Ganoderma* Disease with Remote Sensing in Malaysia



NISFARIZA MOHD NOOR MARIS

Profesora Titular Departamento de Geografía, Facultad de Artes y Ciencias Sociales, University of Malaya
Titular Teacher Department of Geography, Faculty of Arts and Social Sciences

AUTORES: Nisfariza Mohd Noor Maris, Anuar Mohamad Izzuddin, Idris Abu Seman, Malaysian Palm Oil Board (MPOB); Hamzah Arop, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, University of Malaya; Helmi Zulhaidi M. Shafri, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, University of Malaya; Ezzati Bahrom, Departamento de Geografía, Facultad de Artes y Ciencias Sociales, University of Malaya.

CITACIÓN: Noor-Maris, N. M., Seman, I. A., Arop, H., Shafri, H. Z. M., Bahrom, E. (2019). Una década de investigación en teledetección de la enfermedad *Ganoderma* en Malasia. *Palmas*, 40 (Especial Tomo I), 220-230.

PALABRAS CLAVE: índice de gravedad de enfermedad, vehículo aéreo no tripulado (VANT), sistema aéreo, Pudrición basal del estípíte.

KEYWORDS: Disease severity index, unmanned aerial vehicle (VANT), air system, Basal stem rot.

*Artículo original recibo en inglés y traducido por Carlos Arenas París.

Resumen

La investigación en el uso de teledetección hiperespectral para la Pudrición basal del estípíte (PBE) por *Ganoderma* comenzó en 2007, con el objetivo de lograr una detección temprana. Se utilizaron dos sensores hiperespectrales: portátil (GER1500) y sistemas de generación de imágenes (AISA Eagle) en tres niveles experimentales: vivero, campo y aéreo. Una serie de bandas significativas lograron discriminar la PBE por *Ganoderma* en diferentes niveles de gravedad. Esta investigación ha llevado a un marco y métodos de recolección y análisis de datos hiperespectrales en la palma de aceite. No obstante, el uso de mapeo hiperespectral para las plantaciones

es costoso. En 2013, se voló una plataforma VANT con una cámara R/G/NIR para mapear la gravedad de la enfermedad utilizando varios índices multispectrales. La precisión del R/G/NIR para la detección de PBE por *Ganoderma* fue entre moderada y baja. Actualmente, se ha establecido un índice de gravedad de la enfermedad más completo, para validar la serie de bandas significativas de investigaciones previas en un nuevo sensor hiperespectral aéreo (Pika-L), un sensor multispectral VANT (Sequoia) y uno satelital (Kompsat 3A), y RADAR (ALOS PALSAR). Debe demostrarse que el índice de gravedad de enfermedad (DSI, por su sigla en inglés) y las bandas significativas para la detección de *Ganoderma*, son precisos y confiables para un enfoque de manejo de la enfermedad a gran escala, y para el desarrollo de un índice estándar para la PBE por *Ganoderma* en diferentes sensores.

Abstract

The research on the use of hyperspectral remote sensing for *Ganoderma* Basal Stem Rot (BSR) disease was initiated in 2007 with the key to achieve early detection. Two hyperspectral sensors were employed: handheld (GER1500) and imaging systems (AISA Eagle) at three experiment levels: the nursery, the field and airborne. Series of significant bands were able to discriminate *Ganoderma* BSR at different severity level. This investigation has led to a framework and methods of hyperspectral data collection and analysis in oil palm. Nevertheless, utilizing hyperspectral mapping for oil palm plantation is cost intensive. In 2013, an R/G/NIR on the UAV platform was flown to map the disease severity using several multispectral indices. The accuracy of the R/G/NIR for *Ganoderma* BSR detection is between moderate to low. Currently, a more comprehensive disease severity index was established to validate the series of significant bands in previous research on a different airborne hyperspectral sensor (Pika-L). The significant bands must be proven accurate and reliable for a large-scale disease-management approach and development of standard indices for *Ganoderma* BSR across sensor.

Introducción

La enfermedad de la Pudrición basal del estípite (PBE) en la palma de aceite es causada por el hongo *Ganoderma* spp., transmitido por el suelo. Es la única enfermedad patógena que causa graves daños en los campos de palma en el Sudeste Asiático (Turner y Gillbanks, 2003). Ha generado una pérdida sustancial para la industria de la palma de aceite en Malasia e Indonesia (Idris y Roslan, 2012), que influye en la posterior situación económica. No hay dudas sobre la importancia económica de la PBE, que continuará siendo problemática en la ausencia de medidas de control apropiadas. La enfermedad puede resultar en la muerte del 80 % de las plantas en la mitad de su vida económica, y con frecuencia han ocurrido pérdidas que alcanzan el 50 %. Malaysian Palm Oil Board (MPOB, Junta Malasia de Aceite de Palma), en colaboración con varias universidades locales de Malasia, ha hecho uso extensivo de tecnologías de teledetección para *Ganoderma*.

Las especie más agresiva, que causa la PBE, es *Ganoderma boninense* (Idris, 2011). La propagación de esta se induce por el contacto entre las raíces sanas y heridas, y la abundancia de tejidos enfermos en el suelo. El hongo *Ganoderma* crece a lo largo de la raíz infectada y, finalmente, llega al tronco de la palma. La replantación sucesiva y la posterior generación de palmas de aceite en la misma tierra, resulta en una mayor incidencia de la enfermedad: los síntomas se manifiestan incluso antes que en las generaciones anteriores (Idris, 2011).

Es urgente desarrollar un método rápido y preciso para detectar la enfermedad en las plantaciones de palma de aceite (Nisfariza, 2012). Se han desarrollado varias tecnologías principalmente, el medio selectivo de *Ganoderma* (GSM, por su sigla en inglés) (Ariffin *et al.*, 1993), el ensayo inmunoabsorbente ligado a enzimas de anticuerpos

policlonales (PABs-ELISA) (Madiah *et al.*, 2014; Idris y Rafidah, 2008), el Kit PCR-ADN Multiplex (Idris *et al.*, 2010a), y la tomografía GanoSken (Idris *et al.*, 2010b). Estas requieren mucho tiempo y una exhaustiva inspección individual de las palmas de aceite. Es necesario crear tecnologías para la detección aérea de PBE con el fin de obtener resultados más pronto, y poder implementar tareas de manejo y control rápidamente, ahorrando costos.

El uso del ojo humano como detector lleva a muertes más severas de las palmas de aceite, porque algunos de los efectos patológicos de *Ganoderma* solo son visibles en las etapas tardías o, en algunos casos, no se pueden ver en absoluto. Los datos de teledetección hiperspectral aérea ofrecen un mejor enfoque para la detección del estrés de la palma de aceite en grandes áreas de siembra (Shafri y Hamdan, 2009). Las imágenes aéreas utilizan espectrometría de imágenes montada en una plataforma que adquiere imágenes en muchas bandas espectrales angostas y contiguas en las porciones visibles, del infrarrojo cercano, del infrarrojo medio y del infrarrojo térmico del espectro (Nisfariza, 2012; Yang *et al.*, 2011; Izzuddin 2010).

Algunos investigadores han explorado en cierta medida, el uso de datos hiperspectrales recolectados usando espectrorradiómetros de mano para la detección temprana de enfermedades y estrés de las plantas (Izzuddin *et al.*, 2017; Nisfariza, 2012; Delalieux *et al.*, 2005; Delalieux *et al.*, 2007). La mayoría correlacionan los índices de la enfermedad y el estado de salud con relaciones, índices y el 'borde rojo' hiperspectral, particularmente con la clorofila, como un excelente indicador para evaluar la senescencia y el estrés, y el estado de las condiciones fisiológicas y patológicas de la vegetación.

Monitorear las áreas agrícolas requiere de mucho tiempo y trabajo, ya que estamos ante un gran espacio de un cultivo homogéneo que se ve similar de un extremo a otro. Las áreas agrícolas están expuestas a varias amenazas, principalmente ambientales, como la lluvia, sequía y neblina; y a amenazas al organismo, como enfermedades de patógenos y plagas. Por lo tanto, la detección y control de plagas y enfermedades son etapas importantes del manejo agrícola. Las prácticas de cultivo, junto con el control bio-

lógico y químico, son consideradas como el mejor enfoque para controlar las enfermedades y plagas. Pero, al hablar de detección, surgen problemas con la revisión visual y el muestreo de grandes sitios. La teledetección proporciona una posible solución al muestreo intensivo requerido para el manejo de plagas en sitios específicos.

El propósito de la agricultura de precisión es tener conocimiento de los cultivos para aumentar el rendimiento y reducir los costos operativos. Como punto de partida, la investigación en agricultura de precisión es costosa, especialmente si se utilizan tecnologías hiperspectrales. El costo de cada misión hiperspectral en Malasia puede variar entre USD 15.000 y 30.000, dependiendo del sensor, la plataforma y el área de cobertura. Normalmente, la investigación se realiza para atender o responder varias preguntas de conocimiento sobre ciertas cosas e incertidumbres sobre muchas otras. La mayoría de estudios se realizan para analizar y resolver un problema, sin conocer factores relacionados u otros factores que contribuyen a los mismos.

El uso de la teledetección como una herramienta en agricultura ha proporcionado a la agroindustria una renovada manera de abordar el manejo y la toma de decisiones. A su debido tiempo, el costo de la agricultura de precisión se reducirá y se introducirán nuevos avances tecnológicos. En últimas, todos estos avances tecnológicos tienen como objetivo reducir el costo del manejo integral de la plantación y aumentar la rentabilidad a largo plazo.

Una breve hoja de ruta de la investigación sobre la Pudrición basal del estípite por *Ganoderma* en Malasia

La Tabla 1 muestra la hoja de ruta de la investigación en teledetección para *Ganoderma* en MPOB.

Área de estudio

El área de estudio de la investigación se encuentra ubicada en varios viveros y plantaciones en Malasia Peninsular, principalmente en Perak y Selangor.

Tabla 1. Hoja de ruta de la investigación en teledetección para *Ganoderma*.

| Año | Proyecto | Descripción | Equipo | Índice de gravedad de la enfermedad | Métodos | Hallazgos/ Conclusión |
|--------------------------------------|--|--|--|--|--|--|
| 2007 2008 2009 2010 2011 | Teledetección hiperspectral de detección temprana para la enfermedad de <i>Ganoderma</i> | Idea inicial de teledetección hiperspectral para la detección de la enfermedad de <i>Ganoderma</i> Investigación fundamental Experimentos en viveros. Experimentos en palma joven. Experimentos en palma madura | Espectrorradiómetro GER 1500 Sistema de imágenes hiperspectrales AISA DUAL | Establecimiento de DSI para palmas de vivero, jóvenes y maduras para la detección temprana de <i>Ganoderma</i> | Análisis espectral, índice hiperspectral de vegetación, rangos de banda, continuo eliminado, bandas significativas | El DSI es demasiado optimista para lograrlo. Los resultados del análisis espectral proporcionan bandas significativas en los tres niveles de experimentos Mapeo GIS del censo de suelos |
| 2013 | Uso de VANT RGB/NIR | Mapeo de PBE por <i>Ganoderma</i> utilizando una plataforma multiespectral en VANT | Canon IXUS (modificada) RGBNIR en Swinglet | Nuevo DSI para mapeo multiespectral | Clasificación supervisada con y sin filtrado, y con varios tamaños de ventana | Resultados moderados al utilizar RGB/NIR en VANT para la detección de <i>Ganoderma</i> en plantaciones |
| 2017 | Imágenes de alta resolución para la detección de <i>Ganoderma</i> | Mapeo de PBE por <i>Ganoderma</i> utilizando una plataforma satelital de imágenes multiespectrales de alta resolución | Imagen satelital Kompsat 3A, Parrot Sequoia RG/NIR/RedEdge en Ebee | Restablecimiento de un nuevo DSI para la detección de <i>Ganoderma</i> , que incluye más variación en la gravedad de la enfermedad | En progreso | En progreso |
| 2018 | Teledetección hiperspectral | Validación de bandas significativas de las campañas hiperspectrales anteriores | Espectrorradiómetro ASD Pika-L Resonon Generador de imágenes hiperspectrales | | En progreso | En progreso |
| 2019 | Teledetección óptica y por microondas con fusión de datos | Establecer un análisis de datos de fusión de imagen para la detección de la enfermedad <i>Ganoderma</i> , utilizando RADAR e imágenes multiespectrales de alta resolución | ALOS-PALSAR, Kompsat 3 | | En progreso | En progreso |

Censo de suelos

Se realizó el censo de suelos para registrar la ubicación de palmas de aceite sanas y enfermas en el área de estudio. Las infectadas fueron categorizadas en grupos definidos, utilizando un índice de gravedad de la enfermedad (DSI) para PBE en la palma de aceite, y un DSI recién desarrollado para el mapeo hiperspectral actual. La infección con PBE en cada cultivo de palma de aceite fue confirmada con el medio selectivo de *Ganoderma* (GSM). Este usa muestras de tejido del tallo, el tronco o la raíz de la palma de aceite

para confirmar la existencia del patógeno *Ganoderma*. Las muestras se recolectaron utilizando la técnica de perforación.

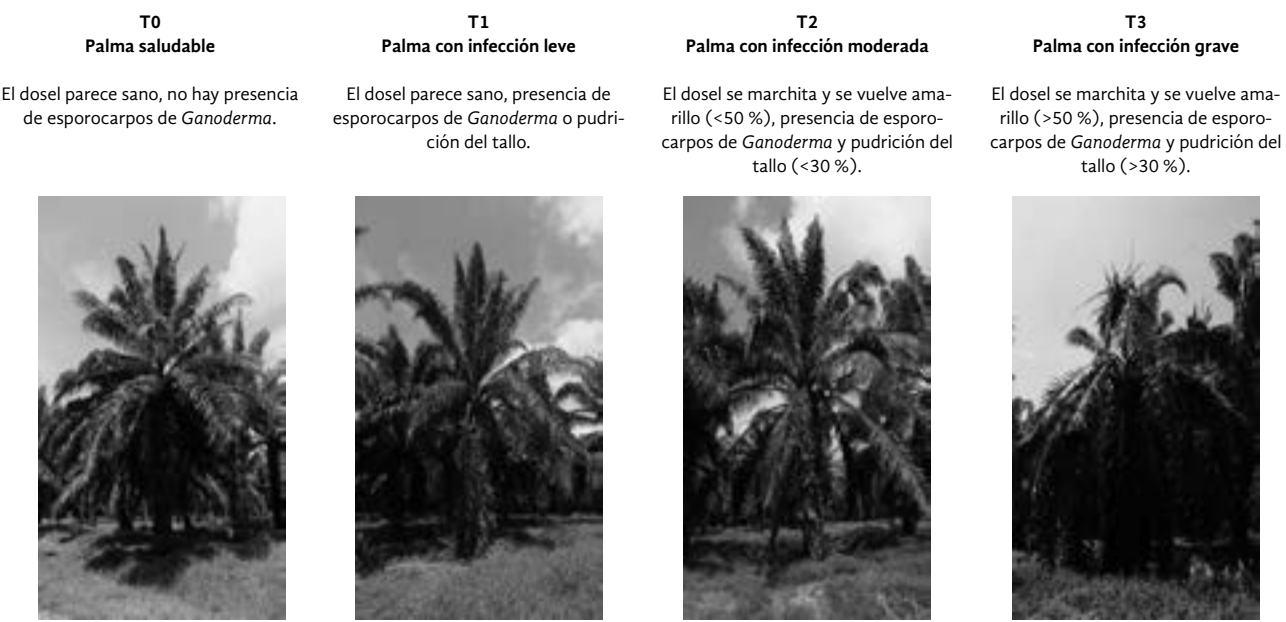
Índice de gravedad de la enfermedad

Con el paso del tiempo se han desarrollado varios DSI para emparejar la detección de *Ganoderma* con los datos de teledetección. La Tabla 2 y la Figura 1 muestran un ejemplo del índice de gravedad de la enfermedad desarrollado para el mapeo VANT en 2013.

Tabla 2. Índice de gravedad de la enfermedad (DSI) de la Pudrición basal del estípite en palma de aceite.

| Índice de gravedad de la enfermedad | Descripción | Evaluación visual |
|-------------------------------------|--|--|
| T0 | Palma de aceite no infectada, en ningún tejido hay hongos de <i>Ganoderma</i> y GSM negativo | Hojas y planta sanas, sin síntomas foliares y ausencia de micelio blanco o esporocarpio (<i>Ganoderma</i>) en la base del tallo |
| T1 | Tallo con infección leve | Hojas y planta sanas, sin síntomas foliares, pequeños botones blancos, cuerpo foliar y tallo en descomposición |
| T3 | Palma infectada con el hongo <i>Ganoderma</i> , con síntomas foliares y micelio blanco o esporocarpio en la base del tallo, GSM positivo | Hojas amarillentas o secas. Tres hojas o más se observan como lanzas, sin abrir. Declinación de las hojas más antiguas. Presencia de pequeño botón blanco o esporocarpio (<i>Ganoderma</i>) en la base del tallo |

Figura 1. Las cuatro clases de DIS que infectaron las palmas de aceite.



Recolección de datos espectrales

Las mediciones recolectadas en este capítulo están directamente relacionadas con el espectro de las palmas en el píxel de la imagen AISA utilizada en análisis posteriores. Se usó un espectrorradiómetro GER 1500 (Spectra Vista Corporation, EE. UU.) para medir la reflectancia foliar de la palma de aceite de la muestra. Este es un espectrorradiómetro de campo de un solo haz y de alto rendimiento, que mide en la longitud de onda del rango visible y del infrarrojo cercano, y permite el escaneo de espectros individuales en milisegundos. Registra 512 canales que se muestran en la longitud de onda de entre 350 – 1.050 nm (visible a infrarrojo cercano) con una resolución espectral de 3,2 nm y un ancho de banda de 1,5 nm. Las mediciones fueron calibradas con un panel estándar blanco de sulfato de bario (BaSO₄), para normalizar las mediciones objetivo y tener en cuenta los cambios en el ángulo del sol y las condiciones atmosféricas.

Imágenes hiperespectrales aéreas

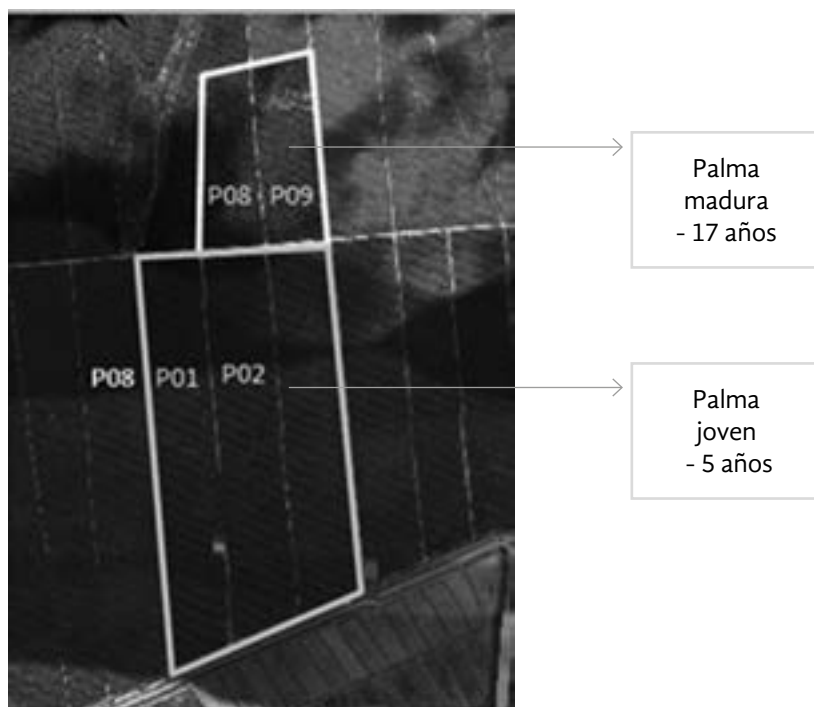
La recolección de datos aéreos se logró el 20 de octubre de 2008. La del suelo se hizo después y dentro de las dos semanas siguientes a la campaña hiperes-

pectral aérea AISA (21-31 de octubre de 2008) (Figura 2). Posteriormente, se determinaron las propiedades patológicas y fisiológicas de cada palma en la muestra. El hiperespectral AISA DUAL consiste en 244 bandas desde 400 nm a 2.500 nm en intervalos de 5 nm, con una resolución de 0,68m en la región del VNIR. La imagen se procesó utilizando ENVI 4.3 y Caligeo propietario. El sensor fue desarrollado y fabricado por SPECIM (Spectral Imaging Limited), Finlandia. Los hiperespectrales AISA (espectrómetro de imágenes aéreas para aplicaciones) son sistemas completos de imágenes de barrido con dos sensores hiperespectrales: el AISA Eagle II y el AISA Hawk II. Consiste en una compacta cabeza del sensor hiperespectral, la unidad de adquisición de datos (PC robusta), una unidad GPS/INS, y un sensor de irradiancia descendente (FODIS).

El sistema de imágenes hiperespectrales con vehículo aéreo no tripulado

El área fue seleccionada con base en la disponibilidad de información censal sobre la incidencia de PBE en la plantación objeto de estudio. El estudio utilizó una Swinglet CAM (Figura 3), que es un vehículo aéreo

Figura 2. Plantación de palma de aceite en Seberang Perak, Malasia (4° 6' N 100° 53' E). Datos adquiridos el 28 de octubre de 2010.



no tripulado (VANT) de ala fija, fabricado por Sensefly, una compañía de Parrot, Suiza. Las imágenes del VANT fueron adquiridas en junio de 2014, sobre una porción de toda la plantación, en donde se reportó incidencia de PBE. La edad de la palma de aceite era de ocho años y estaba en un área de plantación de segunda generación. Las imágenes RGB y NIR se capturaron utilizando un sistema VANT con Swinglet CAM (Figura 3). Dos cámaras de 16 megapíxeles para el VANT, la cámara RGB y la cámara NIR. La RGB cubría el ancho de banda visible 450-750nm y la NIR, de 760-860 nm. La altitud de vuelo del VANT durante la adquisición de imágenes fue de 150 metros aproximadamente, y la resolución de píxeles de la imagen de 10 cm. Las imágenes se tomaron con buen clima y cielo despejado, con una velocidad del viento por

debajo de los 25 km/h. El vuelo fue controlado utilizando una estación inalámbrica en tierra, integrada con *software* eMotion. El VANT llevaba una cámara, un GPS y una unidad de medición inercial (IMU, por su sigla en inglés) que rastrea su posición y permite el funcionamiento del sistema de vuelo autónomo.

Después de la georectificación y de juntar los mosaicos de las imágenes georectificadas se generaron datos DTM. Luego, estos fueron utilizados como insumo para georectificar los mosaicos de las imágenes en una ortofotografía de escena completa de imagen RGB y NIR. Las imágenes resultantes fueron divididas en subconjuntos de 25 hectáreas (0,25 km²) (el cuadro amarillo) como se muestra en la Figura 4 (a) y (b), respectivamente.



Figura 3. Swinglet con cámara compacta modificada.

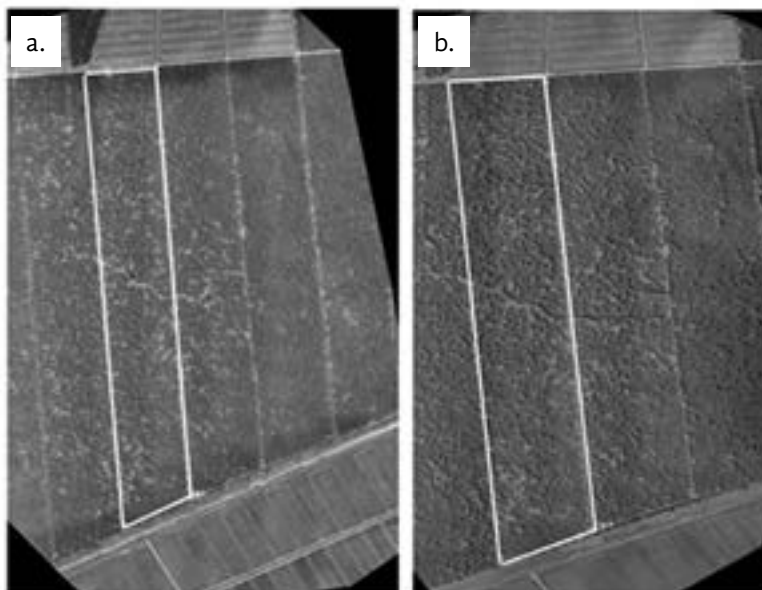


Figura 4. Imagen multispectral basada en VANT de una plantación de palma de aceite. El cuadro amarillo indica el área de estudio. (a) Imagen de mosaico de ortofotografía digital RGB. (b) Imagen de mosaico de ortofotografía digital del NIR.

Análisis de datos

Análisis espectral

Se empleó el análisis espectral para los datos espectrales adquiridos de GER1500, así como en los píxeles espectrales de las imágenes hiperespectrales AISA. Se probaron varias técnicas de análisis espectral, principalmente el derivativo, posición de RedEdge, relaciones de banda, continuo eliminado, entre otras. Las Figuras 5 y 6 muestran las regiones del continuo eliminado y el espectro del continuo eliminado a una característica de absorción de 470 nm.

Procesamiento de imágenes

El procesamiento de todas las imágenes incluye algunos pasos esenciales. El preprocesamiento de los datos hiperespectrales aéreos es crucial antes de realizar

un análisis posterior de la imagen. Esta debe corregirse atmosférica y geométricamente utilizando los metadatos preestablecidos del archivo de cabecera. Lo datos eran enormes y tardaron mucho tiempo en ser procesados.

Técnica estadística comparativa

Se usa un análisis estadístico comparativo para determinar si existe una diferencia significativa entre dos grupos o varios grupos de conjuntos de datos. En este estudio se utilizó la prueba t para determinar si existe una diferencia entre DSI. Esta compara dos medias indicadas dentro de un rango de certeza determinado para observar si las dos medias son distintas, o si la diferencia puede haber ocurrido por casualidad (Harmon, 2011). Se realizó un análisis estadístico comparativo sobre el número digital (DN, por su sigla en inglés) del dosel de la palma de aceite,

Figura 5. Reflectancia y regiones del continuo eliminado.

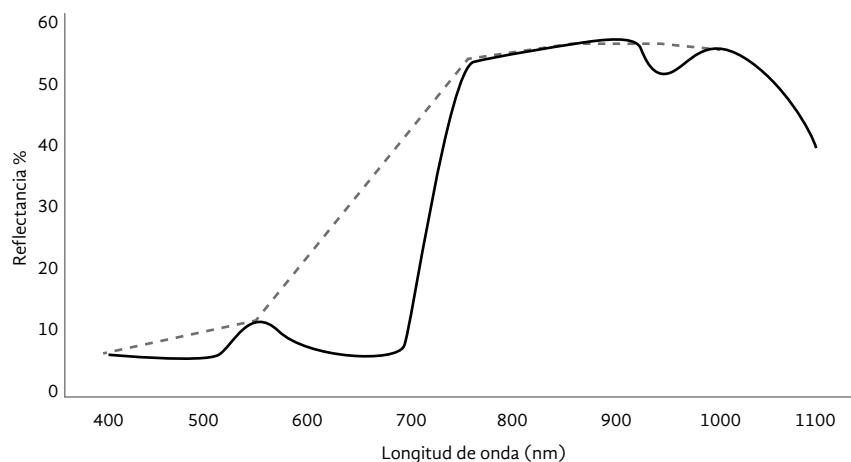
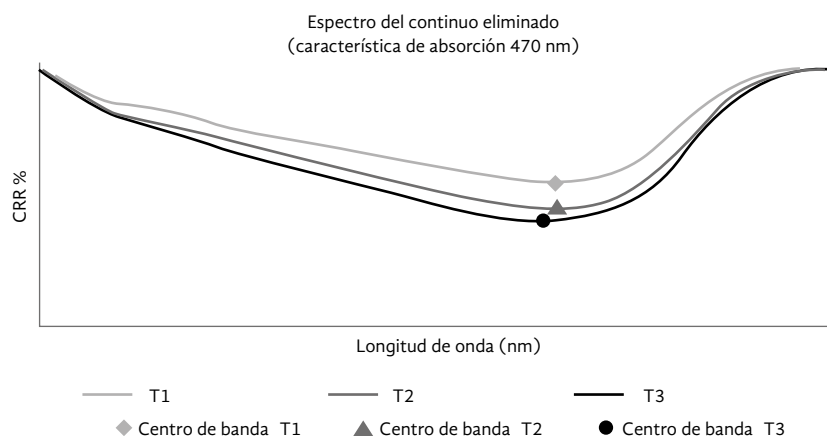


Figura 6. Reflectancia del continuo eliminado (CRR, por su sigla en inglés) o efecto de PBE por *Ganoderma* y control (T1)



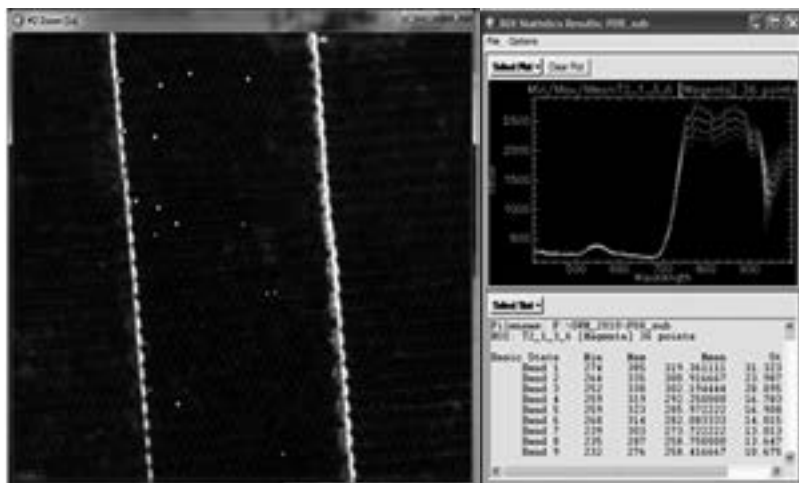


Figura 7. Estadísticas del espectro de la copa seleccionada de la imagen hiperespectral AISA Eagle. (a) Región de interés en la copa de la palma de aceite seleccionada, representante de T1 en verde, T2 en cian y T3 en magenta. (b) Estadísticas de la ROI con base en las plantas seleccionadas.

extraído de cada DSI. El DN se retiró usando una herramienta de región de interés (ROI) proporcionada por el *software* ENVI 4.8. Todas las imágenes raw de AISA hiperespectrales, las multiespectrales en VANT y las Komsat 3A, fueron georreferenciadas al sistema de coordenadas universal transversal de Mercator (UTM, por su sigla en inglés) del World Geodetic System 1984 (WGS-84), con base en un conjunto de puntos de control en tierra dentro del campo de interés, ubicados con un sistema de posicionamiento global diferenciado (DGPS, por su sigla en inglés). La Figura 7 presenta muestras censuradas de palma en la imagen hiperespectral AISA, el píxel puro es extraído de la copa con base en el DSI.

Resultados

Todos los estudios para la detección de *Ganoderma* utilizando teledetección, entre 2007 y 2018, han mostrado un gran progreso en el entendimiento de la relación entre la enfermedad y la reflectancia detectada por el sensor, desde varios aspectos y escalas. La investigación ha sido documentada en diversos artículos de revistas, así como en patentes del método. El estudio fue multidimensional, incorporando diferentes etapas de la enfermedad y del crecimiento de la palma, e instrumentos con diferentes resoluciones espaciales y espectrales, así como un rango de distintos análisis espectrales. Las mediciones de campo fueron diseñadas para permitir un entendimiento fundamental de las propiedades espectrales de la palma de aceite, con

y sin enfermedad. Por otra parte, las mediciones aéreas se utilizaron para probar la viabilidad de la teledetección hiperespectral desde un punto de vista operativo.

En general, se puede concluir que las longitudes de onda en las bandas verde, roja y del infrarrojo cercano, tienen la capacidad de diferenciar entre palmas de aceite sanas e infectadas. Nuestro estudio también sugirió que podría desarrollarse un DSI específico, con una mayor variación de síntomas foliares de sano a enfermo para el censo en terreno, con el fin de obtener resultados estándar que sean comparables entre sensores. En vista de esto, se estableció un estudio integral que consiste en la recolección de datos espectrales, mapeo multiespectral VANT y satelital, mapeo hiperespectral aéreo y RADAR, para establecer resultados que sean comparables entre sensores.

Conclusión

Las tecnologías convencionales de detección de la PBE en la palma de aceite son costosas y toman mucho tiempo. Este negocio agrícola está experimentando una expansión en términos de cobertura terrestre, así como en la optimización de las plantaciones existentes. En general, se ha establecido el manejo y control de la enfermedad por *Ganoderma* en la plantación.

Los datos de teledetección para la clasificación y mapeo de la PBE proporcionan información de-

tallada y completa de forma eficaz en el tiempo. La disponibilidad de imágenes RGB Y NIR de alta resolución espacial y basadas en VANT, ofrece un mejor potencial para la clasificación y mapeo de la PBE en las plantaciones de palma de aceite. Sin embargo, debido al número limitado de bandas, se encuentra que los resultados de los análisis son bastante moderados para considerarlos como una única herramienta para la detección aérea de enfermedades, a pesar de su bajo costo operativo.

El estudio de la detección de la enfermedad por *Ganoderma* en la palma de aceite está madurando en Malasia. Se han recopilado las características importantes y la información espectral y de las bandas. Se han utilizado varios tipos de sensores ópticos, incluyendo multiespectrales, hiperespec-

trales y de microondas para evaluar su capacidad de detectar la enfermedad.

No obstante, una transformación digital integral hacia el mapeo y detección automática todavía está en sus primeros días. Tal y como se discutió anteriormente, tener un sistema de agricultura de precisión cuesta una fortuna. Sin embargo, en el futuro cercano, con la disponibilidad de sensores y equipos a un costo reducido, toda la investigación fundamental en *Ganoderma* para la palma de aceite puede ser utilizada dentro de un sistema de agricultura de precisión, materializándolo. Se requieren trabajos futuros para desarrollar una técnica de detección temprana para la PBE en la palma de aceite, usando imágenes hiperespectrales de VANT.

Referencias

- Ariffin, D., Idris, A. S., & Khairuddin, H. (1993). Confirmation of *Ganoderma* infected palm by drilling technique. *Proc. of the 1993 PORIM International Palm Oil Congress: Update and Vision* (Agriculture), 735-738.
- Delalieux, S., Van Aardt, J., Keulemans, W., & Coppin, P. (2005). Detection of Biotic Stress (*Venturia Inaequalis*) in Apple Trees Using Hyperspectral Analysis. Paper presented at the *Proceedings of 4th EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy*.
- Delalieux, S., Van Aardt, J., Keulemans, W., Schrevers, E., & Coppin, P. (2007). Detection of Biotic Stress (*Venturia inaequalis*) in Apple Trees Using Hyperspectral Data: Non-Parametric Statistical Approaches and Physiological Implications. *European Journal of Agronomy*, 27, 130-143.
- Ezzati, B. (2018). *UAV-Based RGB/NIR Aerial Imaging for the Detection of Ganoderma Disease in Oil Palm Plantation*. MPhil thesis. University of Malaya, Kuala Lumpur.
- Harmon, M. (2011). *T-Tests in Excel - The Excel Statistical Master*. Excel Master Series.
- Hill, R. J., Wilson, B. A., Rookes, J. E., & Cahill, D. M. (2009). Use of high resolution digital multi-spectral imagery to assess the distribution of disease caused by *Phytophthora cinnamomi* on heathland at Anglesea, Victoria. *Australasian Plant Pathology*, 38, 110-119.
- Hunt, E. R., Hively, W. D., Fujikawa, S. J., Linden, D. S., Daughtry, C. S. T., & McCarty, G. W. (2010). Acquisition of NIR-Green-Blue Digital Photographs from Unmanned Aircraft for Crop Monitoring. *Remote Sensing*, 2, 290-305.
- Idris, A. S., & Rafidah, R. (2008). Enzyme linked immunosorbent assay-polyclonal antibody (ELISA-PAb). *MPOB Information Series*, 430, 4.
- Idris, A. S., Mazliham, M. S., Loonis, P., & Wahid, M. B. (2010a). GanoSken for early detection of *Ganoderma*. *MPOB Information Series*, 499, 4.

- Idris, A. S., Rajinder, S., Madihah, A. Z., & Wahid, M. B. (2010b). Multiplex PCR-DNA kit for early detection and identification of *Ganoderma* species in oil palm. *MPOB Information Series*, 531, 4.
- Idris, A. S. (2011). Biology, detection and control of *Ganoderma* in oil palm. Further Advances in Oil Palm Research (2000-2010). In: Basri, M. W., Choo, Y. M., Chan, K. W. (Ed.). *MPOB, Bangi*, 1, 845.
- Idris, A. S., & Roslan, A. (2012). Economic impact of *Ganoderma* incidence on Malaysian oil palm plantation – a case study in Johor. *Oil Palm Industry Economic Journal*, 12, 24-30.
- Izzuddin, M. A. (2010). *Early Detection of Ganoderma Disease in Oil Palm (Elaeis guineensis Jacq.) using Field Spectroscopy*. M.Sc. thesis, Universiti Putra Malaysia, Serdang.
- Izzuddin, M. A., Idris, A. S., Wahid, O., Nisfariza, M. N., & Shafri, H. Z. M. (2013). Field Spectroscopy for Detection of *Ganoderma* Disease in Oil Palm. *MPOB Information Series* 532, 4.
- Izzuddin, M. A., Idris, A. S., Nisfariza, M. N., Shafri, H. Z. M., & Ezzati, B. (2017). The development of spectral indices for early detection of *Ganoderma* disease in oil palm seedlings. *International Journal of Remote Sensing* (In Press).
- Madihah, A.Z., Idris, A. S., & Rafidah, A. R. (2014). Polyclonal antibodies of *Ganoderma boninense* isolated from Malaysian oil palm for detection of basal stem rot disease. *African Journal of Biotechnology*, 13, 3455-3463.
- Nisfariza, M. N. (2012). *Early Detection of Ganoderma Basal Stem Rot Disease of Oil Palm by Hyperspectral Remote Sensing*. Ph. D. thesis, University of Nottingham, United Kingdom.
- Shafri, H. Z. M., & Hamdan, N. (2009). Hyperspectral imagery for mapping disease infection in oil palm plantation using vegetation indices and red edge techniques. *American Journal of Applied Sciences*, 6, 1031-1035.
- Turner, P. D., & Gillbanks, R. A. (2003). *Oil Palm Cultivation and Management*. The Incorporated Society of Planters.
- Yang, W., Sun, C., & Zhang, L. (2011). A multi-manifold discriminant analysis method for image feature extraction. *Pattern Recognition*, 44, 1649-1657.

El futuro de la mecanización en las plantaciones de palma de aceite (Experiencia en Malasia)

The Future in Oil Palm Plantation Mechanization (A Malaysian Experience)

CITACIÓN: Subramaniam, K. (2019) El futuro de la mecanización en las plantaciones de palma de aceite (Experiencia en Malasia). *Palmas 40* (Especial Tomo I), 231-236.

PALABRAS CLAVE: industria de la palma de aceite, nuevas tecnologías, robótica, sostenibilidad, seguridad alimentaria.

KEYWORDS: palm oil industry, new technology, robotic, sustainability, food safety.



IR. KUMAR SUBRAMANIAM
Director SGT Konsult Sdn Bhd

Resumen

Las industrias siempre están buscando nuevas tecnologías para mejorar su producción y aumentar la rentabilidad de sus operaciones. La tecnología moderna es tan solo un avance de la vieja o existente, que aumenta la eficiencia general y reduce el error humano. Las ventajas de la implementación de la mecanización sostenible en la industria conlleva a los siguientes objetivos:

- Mejorar la calidad de las labores.
- Disminuir costos operativos.
- Aumentar la eficiencia operativa.
- Especificar el desarrollo de labores
- Estandarizar el método de trabajo e implementación.
- Supervisar.

- Reducir el trabajo duro y la dependencia de la mano de obra, mejorando la sostenibilidad y la seguridad de las operaciones.
- Optimizar el uso eficiente de los recursos existentes.
- Mitigar los peligros relacionados con el clima.

Lo mismo aplica para la agroindustria de aceite de palma, cultivo y procesamiento, en todo el mundo. Los principales productores en Malasia e Indonesia están enfrentando una enorme escasez de mano de obra principalmente en los cultivos, y por lo tanto, los nuevos insumos tecnológicos son vitales para mantener la agroindustria operando a un nivel sostenible, evitando cualquier impacto causado por la falta de esta.

Las tecnologías existentes para la limpieza del terreno, la siembra, el mantenimiento, la cosecha y el transporte de fruto a las planta de procesamiento, necesitan mejoras continuas para ser sostenibles. La sostenibilidad de la agroindustria de la palma de aceite y su rentabilidad, dependen en gran medida del empoderamiento de la tecnología en robótica, y es así como debe prepararse para adoptarla. Además de permitirle mantenerse vigente y rentable, las nuevas tecnologías también son vitales para reducir los riesgos relacionados con el clima y disminuir los residuos generados en las plantaciones.

Abstract

Industries are always in the hunt for new technologies to improve output and increase profitability of operations. Modern technology is simply an advancement of old or existing technology to improve overall output efficiency by reducing human error. Advantages of implementation of sustainable mechanization in plantation industry are carried out to obtain the objectives below:

- Improved quality of works
- Lower operating cost
- Higher operating efficiency
- Accuracy of delivery of job scope
- Standardization of work method and implementation
- Effective control
- Reduced hard labor and labor dependency thus improves sustainability and safety of operations
- Improves the efficient usage of existing resources
- Mitigating climate related hazard
- Create goodwill

The same is applicable for oil palm plantation and palm oil milling industry around the world. Major produces in Malaysia and Indonesia are facing huge labor shortage in the plantation industry and therefore new technology inputs are vital in keeping the industry operating at sustainable level, avoiding any shocks of labor shortage.

The existing technologies for land clearing, planting, maintenance, harvesting and delivery of crops to processing plants need continuous improvements to be sustainable. The sustainability of oil palm industry and profitability largely depends on empowering technology in robotic and industry must ready to embrace newer technologies to be relevant and profitable. Newer technologies are also vital to reduce climate related hazards and reduce industry wastage being generated by the plantation industry.

Introducción

Las industrias siempre están buscando nuevas tecnologías para mejorar su producción y aumentar la rentabilidad de sus operaciones. La tecnología moderna es tan solo un avance de la vieja o existente, que mejora la eficiencia general de la producción y reduce el error humano. Las economías globales están siendo afectadas por los rápidos cambios en esta, principalmente en las megatendencias, que están modificando la forma en la que ahora vivimos. Comúnmente, han llegado a significar una transformación de los modelos de negocios y las redes de valor, impulsadas por la innovación tecnológica o comercial. También, cada vez hay más evidencia de que dichos cambios pueden venir de políticas públicas, tendencias macroeconómicas, eventos geopolíticos y otros. En Malasia, el Khazanah Research Institute encontró que el 54 % de todos los trabajos podrían estar en un alto riesgo de ser desplazados por la tecnología en las próximas dos décadas. Pero esto puede llegar antes, gracias a los rápidos avances en la robótica, el transporte automatizado, la inteligencia artificial, la biotecnología, los materiales, la genómica y muchos más. En varios países del mundo, la tecnología ha pasado de ser una amenaza a ser una oportunidad, y los beneficiarios han empezado a adoptarla para reducir la brecha entre la oferta y la demanda. Existe una enorme oportunidad para expectativas similares en las plantaciones de palma de aceite.

Perspectiva para la agroindustria de la palma de aceite y las megatendencias

Dependencia de la mano de obra extranjera

La agroindustria de la palma de aceite en Malasia, en particular, está siendo operada aproximadamente con 77 % de mano de obra extranjera (Borneo Post Online, 2017). Según información del Ministerio de Plantaciones, en 2017 había un total de 428.000 trabajadores, de los cuales 328.400 eran extranjeros, principalmente de Indonesia, Bangladesh, Birmania y Nepal. Esto muestra una alta dependencia de

la mano de obra extranjera, supeditada a la política de empleo del respectivo país, que puede cambiar de vez en cuando y afectar los negocios. El Gobierno y las agencias relevantes de Malasia están trabajando para aminorar la dependencia de la mano de obra extranjera, ya que esta solo reduce el factor de sostenibilidad de las plantaciones (Bernama, 2017). Como en Malasia, los principales productores de Indonesia están enfrentando una situación similar en las plantaciones. Los nuevos insumos tecnológicos son vitales para enfrentar el impacto que esto tenga y mantener la industria operando a un nivel sostenible.

Urbanización

Se estima que entre 2010 y 2050 la población urbana se duplicará, pasando de 2.600 millones a 5.200 millones. Este ritmo rápido y sin precedentes trae muchas oportunidades y desafíos. En Malasia, el promedio de crecimiento de la población urbana es del 4 % anual, uno de los más altos de la región (The World Bank, 2015). Esto significa menos disponibilidad de mano de obra en áreas rurales, en donde se encuentran la mayoría de las plantaciones.

Preferencia de estilo de vida

Gran parte del mundo en desarrollo está experimentando un desafío tecnológico muy diferente al de las economías avanzadas, que están diseñando un sistema educativo apropiado para preparar a una población abrumadoramente joven para el trabajo. Esto es muy importante, ya que existe evidencia clara de que los jóvenes malayos evitan el trabajo considerado como de las tres D (*dirty, dull and dangerous*, sucio, aburrido y peligroso). Características que tiene el trabajo en las plantaciones.

Avance tecnológico

Inteligencia artificial y big data

La digitalización crea exponencialmente más datos sobre todo y todos. Paralelamente, la sofisticación de los problemas que pueden ser solucionados con *software*, y la capacidad de este para aprender y evolucionar por su cuenta, avanza rápidamente. Esto se basa en el auge del big data para discernir, y en la in-

fluencia que la IA y la robótica están comenzando a tener en la toma de decisiones y en los trabajos.

Computación, comunicaciones y almacenamiento

El rápido y continuo descenso en el tamaño y el costo de las tecnologías de computación y conectividad, están impulsando un crecimiento exponencial en el potencial para acceder y aprovechar internet. Esto dará lugar a la disponibilidad de una capacidad de computación ubicua, en la que todos tienen acceso a una supercomputadora en sus bolsillos, con espacio de almacenamiento casi ilimitado, convirtiéndose en un gran facilitador en los sectores remotos de plantaciones.

Oportunidad para reimaginar la agroindustria de la palma de aceite

La palma de aceite, pasó de ser una planta ornamental para convertirse en una materia prima agrícola, que genera miles de millones de dólares en Malasia. Desde sus inicios como un monocultivo en 1917, ha crecido hasta cubrir más de 5.7 millones de hectáreas en 2016, mostrando su impacto en el tiempo. Hay muchos enfoques y medidas que se ya se han tomado para reimaginar esta agroindustria. A continuación se mencionan algunos de los grandes pasos que se están implementando:

- i. Estrategias para atraer a la generación más joven para que participe en los trabajos de plantación.
- ii. Crear centros de entrenamiento para capacitar más fuerza laboral local que ingrese a la plantación.
- iii. Introducir regulaciones de salario mínimo para hacer que la industria de la palma de aceite sea más atractiva para la población joven.
- iv. Mejorar la calidad de vida, con obras de infraestructura.
- v. Optimizar los servicios de salud.
- vi. Financiar y promover la implementación de nuevos sistemas de mecanización, con los que se reducirá el trabajo duro y el número de empleados involucrados en las labores del cultivo.
- vii. Apoyar a las áreas de investigación y desarrollo para que introduzcan tecnología robótica

y así favorecer la producción reduciendo el error humano.

- viii. Dar prioridad a los problemas ambientales y de sostenibilidad para garantizar que la plantación siga siendo atractiva para la fuerza laboral del futuro.

El hecho es que la dependencia en las operaciones basadas principalmente en mano de obra, incluyendo la extranjera, se está volviendo más onerosa cada año que pasa. Esto se debe a varias políticas del gobierno (locales y del país de origen de la mano de obra extranjera), al incremento de costos por parte de las agencias intermediarias y a la expansión del área cultivada. A esto se suma, el aumento de los problemas sociales y socioeconómicos, asuntos que la agroindustria debe también abordar.

Por lo tanto, el camino clave para el cultivo en esta Revolución Industrial No. 4 (RI 4.0), es una mecanización moderna, que se convertirá en un aspecto vital para que la palma de aceite siga siendo sostenible y rentable al mismo tiempo. De hecho, el cambio ya está presente con el uso de drones, inteligencia artificial, y sistemas de información geográfica (SIG). Como ejemplo, se están utilizando drones para apoyar las labores como trazado de plantaciones y siembra de palmas, determinación de requerimientos de nutrientes y fumigación precisa de pesticidas.

Otro, es el método de manejo de la plantación basado en la nube, con el que las compañías pueden configurar sus sistemas de forma rápida en tan solo unos días, en vez de meses, lo que se traduce en costos significativamente más bajos y en más beneficios. El uso de las imágenes satelitales también ha ayudado a evolucionar la agroindustria, ya que mediante estas es posible diagnosticar condiciones individuales en las plantaciones de palma de aceite y recolectar datos valiosos, algo que un trabajador normal no podría hacer de forma sostenible. Por cada hectárea, las compañías pierden RM 1,5 millones en ingresos anuales debido a entre un 6 % y un 8 % de plantas faltantes, a la densidad irregular de siembra y a límites imprecisos. Todos estos problemas se pueden controlar y prevenir fácilmente utilizando varias tecnologías, que también ayudan a ahorrar costos en mano de obra. Mientras que a un trabajador le toma un día fumigar el área, un dron puede hacerlo en siete minutos. Ac-

tualmente, en Malasia, la proporción de tierra a mano de obra es de 1:10 y el objetivo es de 1:20. La única manera de lograrlo es que la industria avance hacia la automatización y mecanización.

El reciente terremoto en la isla Lombok, Indonesia, ha servido como una buena lección sobre la sostenibilidad de las operaciones para los propietarios de plantaciones en los estados de la Costa Este de Malasia Peninsular. La dependencia en los trabajadores de Lombok era muy alta, y justo después del terremoto, la mayoría de ellos decidió regresar a la isla para estar con sus familias y evaluar los daños y pérdidas, sin confirmar si regresarían. Las actividades como la poda, fertilización, cosecha y transporte de frutos a las plantas de procesamiento se detuvieron por completo, creando una situación caótica. No se debe esperar a que ocurra una situación similar para buscar otras opciones y, principalmente, mejorar la mecanización existente en la plantación hacia una tecnología mucho más moderna, que reduzca la dependencia en la mano de obra y, al mismo tiempo, mejore la producción (Bahri, 2017).

Beneficios tangibles y directos de una mecanización mejorada

No se puede negar el hecho de que la agroindustria requiere métodos modernos de mecanización a un costo económico de compra, implementación y mantenimiento. La tecnología debe ser amigable con el usuario, poder implementarse en varios tipos de terreno de siembra, disminuir la huella de carbono, eliminar el uso de combustibles fósiles de la maquinaria agrícola y reducir el trabajo duro.

Las ventajas de la implementación de la mecanización sostenible en la agroindustria se pueden aprovechar para lograr los siguientes objetivos:

- Mejor la calidad de las labores.
- Menores costos operativos.
- Mayor eficiencia operativa.
- Precisión en las labores.
- Estandarización del método de trabajo e implementación.

- Control efectivo.
- Reducción del trabajo duro y la dependencia de la mano de obra, mejorando la sostenibilidad y la seguridad de las operaciones.
- Mejorar el uso eficiente de los recursos existentes.
- Mitigar los peligros relacionados con el clima.

Las tecnologías existentes para la limpieza del terreno, la siembra, el mantenimiento, la cosecha y transporte de fruto a la planta de procesamiento necesitan mejoras continuas para ser sostenibles. La sostenibilidad de la agroindustria y su rentabilidad, dependen en gran medida del empoderamiento de la tecnología en robótica, y es así como debe prepararse para adoptarla. Además de permitirle mantenerse vigente y rentable, las nuevas tecnologías también son vitales para reducir los riesgos relacionados con el clima y los residuos generados en las plantaciones.

Mirando hacia el futuro

La agroindustria se encuentra en un punto, en el que es necesario reducir la dependencia en la mano de obra y mantener las operaciones de la plantación mediante la introducción de modernas tecnologías robóticas (Borneo Post Online, 2014). El problema de que no va a proporcionar oportunidades laborales para el mercado local y no va a dar un giro positivo a las actividades económicas decrecientes, ya no será el centro de atención. La fuerza laboral local se está alejando de la agroindustria. El costo y los problemas sociales relacionados con la mano de obra extranjera están aumentando año tras año. Ante esto, la mecanización basada en tecnologías robóticas modernas es una opción clara para que se adopte e implemente.

La nueva tecnología y el concepto de plantación digital se está volviendo realidad y va a ser muy precisa, reduciendo drásticamente los errores humanos.. Migrar a esta es la mejor opción para que la agroindustria logre la sostenibilidad de sus operaciones, aumente el valor de sus productos y, al mismo tiempo, continúe siendo amigables con el medioambiente.

Referencias

- Borneo Post Online. (2017). 77 % of plantation workers are foreigners. Recuperado de: <http://www.theborneopost.com/2017/08/06/77-of-plantation-workers-are-foreigners/>
- Bernama. (2017). PLASMA can reduce dependency on foreign workers in plantation. Recuperado de: <http://english.astroawani.com/malaysia-news/plasma-can-reduce-dependency-foreign-workers-plantation-151559>
- Bahri, S. (2017). More automation at plantations. Recuperado de: <https://www.thestar.com.my/metro/metro-news/2017/10/13/more-automation-at-plantations-use-of-machinery-expected-to-improve-productivity/>
- Borneo Post Online. (2014). Look into using latest technologies or even robotics, Uggah tells oil palm industry. Recuperado de: <http://www.theborneopost.com/2014/06/10/look-into-using-latest-technologies-or-even-robotics-uggah-tells-oil-palm-industry-players/>
- Kushairi, A., Singh, R., and Ong-Abdullah, M. (2017). The Oil Palm Industry in Malaysia: Thriving with transformative technologies. *Journal of Oil Palm Research*, 29 (4). The World Bank. (2015). Urban Development Series, East Asia's Changing Urban Landscape: Measuring a Decade of Spatial Growth. Recuperado de: https://www.worldbank.org/content/dam/Worldbank/Publications/Urban%20Development/EAP_Urban_Expansion_full_report_web.pdf

Esta publicación presentación 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.



Federación Nacional de Cultivadores
de Palma de Aceite, Fedepalma
www.fedepalma.org